

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách
dle ČSN EN 60909
Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC Networks
by EN 60909

2013

Petr Krejčí

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Krejčí**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách dle
ČSN EN 60909
Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC Networks by
EN 60909

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor zkratových jevů
2. Metodika výpočtu zkratových proudů dle ČSN EN 60909
3. Výpočet zkratových poměrů pro rozvodny vn průmyslového podniku
4. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojáněk, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
2. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
3. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex a.s., Ostrava, 2008.
4. Technická dokumentace rozveden vn průmyslového podniku.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7. 5. 2013

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Dr. Ing. Zdeňkovi Medvecovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rozbořem zkratových jevů a následně jejich uplatněním při výpočtu zkratových poměrů průmyslového podniku. V první části je uveden teoretický rozbor zkratových jevů, jako jsou příčiny vzniku a jejich případné následky. Následující tři kapitoly vychází z normy ČSN EN 60909 a popisují metodiku a předpoklady výpočtu, dále výpočty parametrů jednotlivých prvků elektrizační soustavy a následný popis výpočtu dílčích typů zkratů. V Závěrečné (praktické) části je uveden příklad výpočtu zkratových poměrů rozvodny VN průmyslového podniku. K výpočtu je zvolena metoda výpočtu pomocí poměrných hodnot.

Klíčová slova:

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, zkratová impedance, zkratový obvod, vztažný výkon

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of short-circuit phenomena and then applying them in the calculation of short-circuit conditions in industry. The first section provides a theoretical analysis of short-circuit phenomena such as causes and their potential consequences. The following three chapters are based on the standards EN 60909 and describe the methodology and assumptions calculation for computing the parameters of individual elements of the electricity system and the subsequent description of the calculation of the sub-type of short circuit. In the final (practical) part is an example of the calculation of short-circuits conditions substation high voltage industrial enterprise. The calculation method is chosen by calculating the relative values.

Key words:

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, short-circuit impedance, reference power

Seznam použitých značek

A		Počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d,c}$
\underline{a}		Komplexní konstanta
c		Napětový součinitel
$cU_n/\sqrt{3}$	(V)	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
E''	(V)	Rázové napětí synchronního stroje
F	(Ω)	Zkratové impedance v místě zkratu
I	(A)	Proud
$i_{d.c.}$	(A)	Stejnoseměrná (aperiodická) složka zkratového proudu
i_p	(A)	Nárazový zkratový proud
i_k	(A)	Ustálená složka zkratového proudu
i'_k	(A)	Přechodná (tranzitní) složka zkratového proudu
i''_k	(A)	Rázová (subtranzitní) složka zkratového proudu
I_b	(A)	Souměrný zkratový vypínací proud
I_k	(A)	Ustálený zkratový proud
I''_K	(A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_{LR}	(A)	Záběrový proud
I_{th}	(A)	Ekvivalentní oteplovací proud (efektivní hodnota)
R	(Ω)	Rezistance, absolutní popřípadě poměrná hodnota
R_k	(Ω/km)	Razistance kabelu na kilometr délky
R_v	(Ω)	Rezistance kabelového vedení
S''_k	(MVA)	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
S_v	(MVA)	Vztažný výkon
t_{min}	(s)	Minimální doba vypnutí
$T_{d.c.}$	(s)	Časová konstanta stejnosměrné (aperiodické) složky $i_{d.c.}$
T_k	(s)	Doba trvání zkratového proudu, časová konstanta zkratového proudu
T'_k	(s)	Časová konstanta přechodné (tranzitní) složky zkratového proudu
T''_k	(s)	Časová konstanta rázové (subtranzitní) složky zkratového proudu
u_k	(%)	Napětí nakrátko transformátoru (jmenovité)
U_n	(V)	Jmenovité napětí sítě
U_s	(V)	Napětí spotřebiče
U_z	(V)	Napětí zdroje
X''_d	(Ω)	Rázová reaktance synchronního stroje
X_k	(Ω/km)	Reaktance kabelového vedení na kilometr délky
X_S	(Ω)	Reaktance soustavy
X_v	(Ω)	Reaktance kabelového vedení
Z	(Ω)	Impedance, absolutní příp. poměrná hodnota
$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(3)}$	(Ω)	Impedance sousledné, zpětné a netočivé třífázové soustavy
\underline{Z}_k	(Ω)	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
Z_s	(Ω)	Impedance spotřebiče
Z_v	(Ω)	Impedance vedení
φ	($^\circ$)	Fázový úhel

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Teoretický rozbor zkratových jevů	2
2.1.	Vznik zkratu.....	3
2.1.1.	Nesouměrný zkrat.....	4
2.1.2.	Souměrný zkrat.....	4
2.2.	Průběh zkratového proudu	4
2.2.1.	Elektricky blízký zkrat.....	5
2.2.2.	Elektricky vzdálený zkrat.....	6
2.3.	Účinky zkratového proudu.....	7
2.3.1.	Elektrodynamické účinky.....	7
2.3.2.	Tepelné účinky	7
2.3.3.	Přepětí	7
2.3.4.	Elektrický oblouku.....	8
2.3.5.	Pokles napětí a narušení stability.....	8
3.	Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909	9
3.1.	Definice základních pojmů pro výpočet dle ČSN-EN-60909	9
3.2.	Předpoklady výpočtu	12
3.3.	Metoda výpočtu.....	12
3.3.1.	Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu.....	12
3.3.2.	Použití souměrných složek	15
3.4.	Maximální zkratové proudy	17
3.5.	Minimální zkratové proudy.....	17
4.	Zkratové impedance elektrických zařízení	18
4.1.	Síťové napáječe	18
4.2.	Transformátory.....	19
4.2.1.	Dvouvinutové transformátory	19
4.2.2.	Trojvinutové transformátory	20
4.3.	Venkovní vedení a kabely.....	21
4.4.	Reaktory omezující zkratový proud.....	21
4.5.	Synchronní stroje.....	22
4.5.1.	Synchronní generátory	22
4.5.2.	Synchronní kompenzátory a motory	22
4.6.	Asynchronní motory	23
4.6.1.	Všeobecně	23
4.6.2.	Příspěvky zkratových proudů od asynchronních motorů	24
5.	Výpočet zkratových proudů.....	25
5.1.	Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	25
5.1.1.	Trojfázový zkrat.....	25
5.1.2.	Dvoufázový zkrat.....	25
5.1.3.	Dvoufázový zemní zkrat	25
5.1.4.	Jednofázový zkrat	26
5.2.	Nárazový zkratový proud i_p	26
5.2.1.	Trojfázový zkrat.....	26

5.2.2.	Dvoufázový zkrat.....	27
5.2.3.	Dvoufázový zemní zkrat	27
5.2.4.	Jednofázový zkrat	27
5.3.	Stejnoseměrná složka zkratového proudu.....	27
5.4.	Souměrný vypínací zkratový proud I_b	28
5.4.1.	Vzdálený zkrat	28
5.4.2.	Blízký zkrat	28
5.5.	Ustálený zkratový proud	29
5.5.1.	Maximální ustálený zkratový proud.....	29
5.5.2.	Minimální ustálený zkratový proud	29
5.6.	Jauleův integrál a ekvivalentní oteplovací proud	30
6.	Výpočet zkratových poměrů rozvodu průmyslového podniku	32
7.	Závěr	39
	Použitá literatura:.....	40

Seznam obrázků:

Obr. 1 Úbytek napětí ve zkratovém obvodu	2
Obr. 2.1. Rázová složka	5
Obr. 2.2. Přechodná složka	5
Obr. 2.3. Ustálená složka	5
Obr. 2.4. Stejnoseměrná složka	5
Obr. 2 Složky zkratového proudu	5
Obr. 3 Časový průběh elektricky blízkého zkratu	6
Obr. 4 Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu	6
Obr. 5a Souměrný trojfázový zkrat	13
Obr. 5b Dvoufázový zkrat	13
Obr. 5c Dvoufázový zemní zkrat	13
Obr. 5d Jednofázový zkrat	13
Obr. 5 Charakteristiky zkratů a jejich proudů	13
Obr. 6a Schéma soustavy	14
Obr. 6b Náhradní schéma obvodu sousledné složky	14
Obr. 6 Ilustrace výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu I_k'' využívající ekvivalentní napěťový zdroj	14
Obr. 7a Sousledná složka zkratové impedance $Z_{(1)}$	16
Obr. 7b Zpětná složka zkratové impedance $Z_{(2)}$	16
Obr. 7c Netočivá složka zkratové impedance $Z_{(0)}$	16
Obr. 7 Zkratové impedance trojfázového střídavého systému v místě zkratu F	16
Obr. 8a Bez transformátoru	18
Obr. 8b S transformátorem	18
Obr. 8 Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťové napaječe	18
Obr. 9a Označení zapojení vinutí	20
Obr. 9b Náhradní schéma (sousledné složkové soustavy)	20
Obr. 9 Trojvinutový transformátor (příklad)	20
Obr. 10 Součinitel κ pro sériové obvody jako funkce poměru R/X nebo X/R	27
Obr. 11 Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu	31
Obr. 12 Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu	31
Obr. 13 Náhradní schéma zkratového obvodu rozvodny R2 22kV	33
Obr. 14 Zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV	36
Obr. 15 Zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV	37
Obr. 16 Výsledné zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV	37

Seznam tabulek:

Tab. 1 Pravděpodobnost výskytu zkratu	3
Tab. 2 Napěťový součinitel c	14
Tab. 3 Parametry synchronních motorů	32
Tab. 4 Parametry transformátorů	32
Tab. 5 Parametry kabelových vedení	32
Tab. 6 Zkratové poměry jednotlivých rozvodů průmyslového podniku	38

1. Úvod

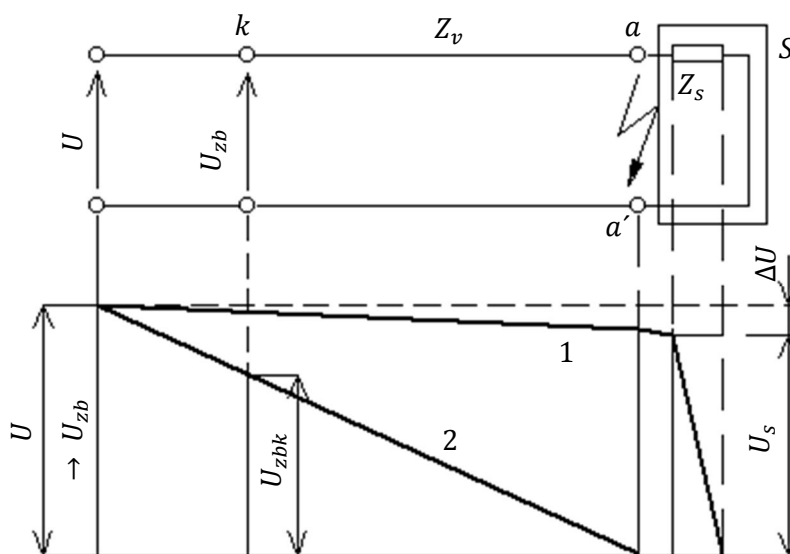
U všech elektrických zařízení musíme počítat kromě běžných provozních stavů i stavy poruchové jako je např. zkrat. Těmto poruchovým stavům nelze zcela zabránit ani v případech, kdy zařízení odpovídá všem předpisům a normám. Zkraty patří mezi časté poruchy na vedeních, jak kabelových tak venkovních. Zkrat chápeme jako chybné vodivé spojení mezi fázemi nebo zemí v uzemněné soustavě. Tím dochází ke vzniku nežádoucích zkratových proudů. Proto je nutné zajistit vhodným řešením všechna elektrická zařízení, aby při poruchových jevech byly jejich následky co možná nejmenší a nebyly nebezpečné pro samotná zařízení, jejich obsluhu a bezprostřední okolí. Abychom tohoto dosáhli, musíme umět stanovit velikosti zkratových proudů a jejich případné účinky.

Stanovením velikostí zkratových proudů v třífázových elektrizačních soustavách se zabývá norma ČSN EN 60909. Je to česká verze evropské normy EN 60909, která popisuje postup výpočtu zkratů v trojfázových střídavých soustavách. Norma nahrazuje starší normu ČSN 33 3020(2), zavádí jednotný postup výpočtu lišící se přesností a pracností výpočtu. Norma nepracuje s časovými konstantami, ale pouze s poměrem R/X .

2. Teoretický rozbor zkratových jevů

Pod pojmem zkratové jevy chápeme jevy, které vznikají v elektrizačních soustavách náhodným nebo úmyslným vodivým spojením dvou nebo tří fází a v soustavách s uzemněnou nulou také vodivým spojením jedné nebo dvou fází se zemí. Při tom vznikají zkratové proudy značných velikostí.

Velikost zkratového proudu vyplývá z Ohmova zákona. Předpokládejme, pro naše úvahy jednoduchý zkratový obvod viz. Obr. 1. Se zdrojem napětí U napájený přes vedení o impedanci Z_v spotřebič S o impedanci Z_s .



Obr. 1 Úbytek napětí ve zkratovém obvodu

1 - při normálním provozu, 2 - při zkratu na svorkách spotřebiče S

(Z_v – impedance vedení, Z_s – impedance spotřebiče, U_s – napětí na spotřebiči, U_{zbk} – zbytkové napětí v místě k)

Při normálním bezporuchovém provozu protéká obvodem proud

$$I_n = \frac{U}{Z_v + Z_s} \quad (1)$$

Napětí na spotřebiči

$$U_s = U - \Delta U = I_n Z_s \quad (2)$$

V případě zkratu v místě a (na svorkách spotřebiče) je z proudového obvodu vyřazena impedance Z_s a proud, tentokrát zkratový, je omezen pouze impedancí Z_v . Jeho velikost je

$$I_k = \frac{U}{Z_v} \quad (3)$$

Protože je impedance spotřebiče Z_s , mnohokrát větší než impedance vedení, takže $Z_v + Z_s \gg Z_v$, je i zkratový proud mnohokrát větší než normální provozní proud.

Napětí v místě zkratu klesne na nepatrnou hodnotu (teoreticky až na nulu). To znamená, že celé vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, transformátorech, venkovních popř. kabelových vedeních, nebo dalších prvcích sítě. [6, str. 12-13]

2.1.Vznik zkratu

Cizí zásahy:

Nejčastější příčinou zkratů je poškození elektrických zařízení *cizími zásahy*. Například překopnutím či přetržením kabelových rozvodů v zemi při výkopových pracích nebo jiných úpravách terénu těžkou technikou, působení hlodavců na pláště kabelů.

U venkovních vedení jsou způsobeny především povětrnostními a přírodními vlivy (pády stromů a větví, dotykem větví vedení při větru).

Vady a nedokonalosti zařízení:

Častou příčinou vzniku zkratů jsou *vady* elektrických zařízení nebo jejich *nedokonalosti*. Bývá to především špatná izolace kabelů způsobená špatnou výrobou nebo vlivem stárnutí a tím snížením izolační schopnosti. Zhoršení kvality izolace většinou zapříčiňuje dlouhodobé přetěžování kabelových vedení – zrychlené stárnutí izolace způsobené zvýšenou teplotou při nadproudech. Tyto izolační vady nevznikají bezprostředně po instalaci, ale až po delším provozu zařízení.

Dále při špatné montáži (nepředpisovém pokládání kabelů, nedodržení technologie při montáži kabelových spojek a koncovek atd.

Přepětí:

Atmosférické přepětí vznikají na venkovních vedeních elektrickou indukcí při výbojích mimo vedení nebo přímým zásahem blesku do vedení. Bouřková přepětí trvají krátkou dobu (do 100 μ s), mohou však při přímých úderech blesku do vedení dosáhnout kritických hodnot, kterým izolace nedokáže odolat.

Chybnou manipulací (selhání lidského činitele):

K chybné manipulaci dochází nejčastěji v různých (zvláště složitých) elektrických zařízeních. Například vypnutí přípojnicového odpojovače při zatížení. Odpojovačem lze odepínat jen určité malé proudy. Pokud se vypínají proudy větší, vznikne mezi kontakty odpojovače oblouk, který zionizuje prostředí mezi póly odpojovače a po několika milisekundách dochází k trojfázovému zkratu.

Dále ponecháním cizího předmětu (zvláště kovového) v zařízení po předchozí demontáži.

Nedostatečná zkratová odolnost zařízení:

Vyskytuje se u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů. V důsledku částečného poškození zařízení při zkratu pak dochází k následným poruchám. [6, 7]

Tab. 1 Pravděpodobnost výskytu zkratu

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu %		
	VN	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

2.1.1. Nesouměrný zkrat

Nesouměrnými zkraty je nazýváme, protože proudy tekoucí jednotlivými fázemi působí na soustavu nesouměrně. Všechny fáze nejsou zatíženy souměrně.

Jednofázový zkrat: Nastane v soustavě s uzemněným uzlem popř. vyvedeným středním vodičem při spojení jedné z fází se zemí nebo středním vodičem. Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení.

Dvojfázový zkrat: Nastane při spojení kterýchkoli dvou fází trojfázové soustavy se zemí.

Dvojfázový zemní zkrat: Nastane, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí.

Simultánní zkrat: jedná se o zvláštní případ dvojfázového zkratu, vzniklý spojením dvou různých fází trojfázové soustavy na dvou různých místech.

2.1.2. Souměrný zkrat

Souměrný (trojfázový zkrat) vzniká náhodným nebo úmyslným spojením všech tří fází do krátka, popřípadě se zemí. Všechny vodiče jsou postiženy stejně a teče jimi stejný zkratový proud. Souměrný zkrat nejčastěji vzniká v kabelových sítích. Elektrický oblouk, vzniklý při zkratu velice snadno díky jeho vysoké teplotě poruší izolaci mezi všemi fázemi a dochází k třífázovému zkratu. Často vede k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.

Tím že jsou všechny fáze postiženy stejně, působí zkratové proudy na soustavu symetricky na rozdíl od nesouměrného zkratu.

Souměrné a nesouměrné zkraty můžeme dále dělit na:

Dokonalý zkrat: vzniklý dokonalým především kovovým spojením, kdy impedance v místě zkratu je zanedbatelná vzhledem ke zbytku zkratového obvodu.

Nedokonalý zkrat: způsobený například větví, která má určitý odpor. V tomto případě impedance zkratového spojení značně ovlivňuje velikost zkratového proudu (nedosahuje se takových velikostí zkratových proudů jako při dokonalém zkratu).

Obloukový zkrat: může, vzniknou ve všech případech.

2.2. Průběh zkratového proudu

Při vzniku zkratu v elektrizačních soustavách se mnohdy několikanásobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a zdroji. To má za následek vzrůst proudů ve větvích a pokles napětí v uzlech. Tím se elektrizační soustava dostává z normálního (provozního) stavu, do stavu poruchového. Tato změna nenastává v jediném okamžiku, a proto má zkratový proud v závislosti na čase neharmonický průběh. Největší hodnoty zkratový proud dosahuje v prvních okamžicích po vzniku zkratu. S rostoucím časem zkratový proud klesá, až se ustálí na harmonickém průběhu, tento průběh se skládá ze *střídavé* a *stejnoseměrné složky*. [1]

Reálný časový průběh obsahuje tyto základní složky:

Střídavou složku

Která má konstantní amplitudu jeho frekvence je dána frekvencí zdroje. Střídavá složka zkratového proudu se skládá obecně z těchto tří složek *rázové složky, přechodné složky a ustálené složky*:

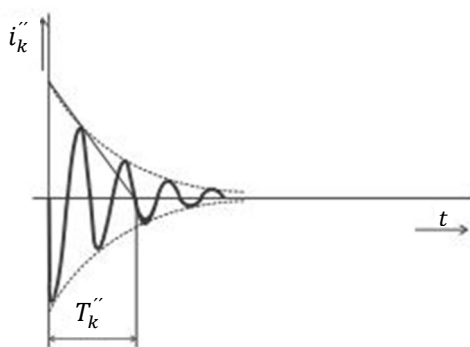
Rázová (subtranzitní) složka $i_k''(t)$ Obr. 2.1. - má sinusový průběh s frekvencí soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' . Projevuje se na začátku zkratu a trvá méně než desetinu sekundy, je to složka rychle doznívající.

Přechodná (tranzitní) složka $i_k'(t)$ Obr. 2.2. - má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplitudu exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k' . Jedná se o složku pomaleji doznívající. Doba zániku bývá zpravidla řádově v sekundách.

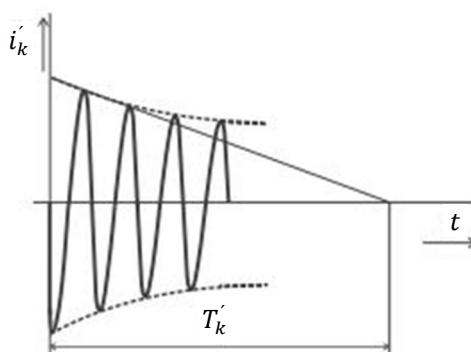
Ustálená složka $i_k(t)$ Obr. 2.3. - má sinusový průběh s frekvencí soustavy a konstantní amplitudu [7]

Stejnosemřnou složku

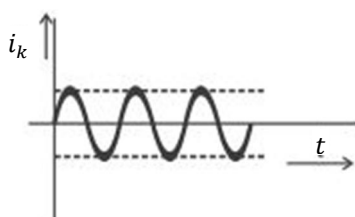
Stejnosemřná (aperiodická) složka $i_{d.c.}(t)$ Obr. 2.4. - Představuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou $T_{d.c.}$. Počáteční velikost stejnosměrné složky závisí na okamžiku, ve kterém nastane zkrat. Zkratový proud bývá převážně indukčního charakteru (proud je za napětím opožděn o asi 90°). Lze potom vyvodit, že maximální stejnosměrná složka vznikne, pokud bude okamžitá hodnota napětí v okamžiku zkratu nejmenší. Tento poznatek můžeme aplikovat pro jednofázové střídavé obvody.[6, 7]



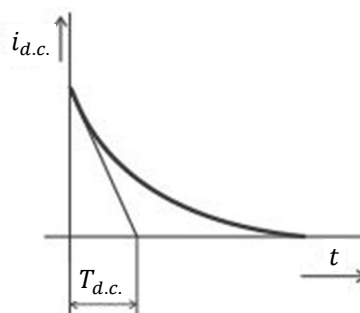
Obr. 2.1. Rázová složka



Obr. 2.2. Přechodná složka



Obr. 2.3. Ustálená složka

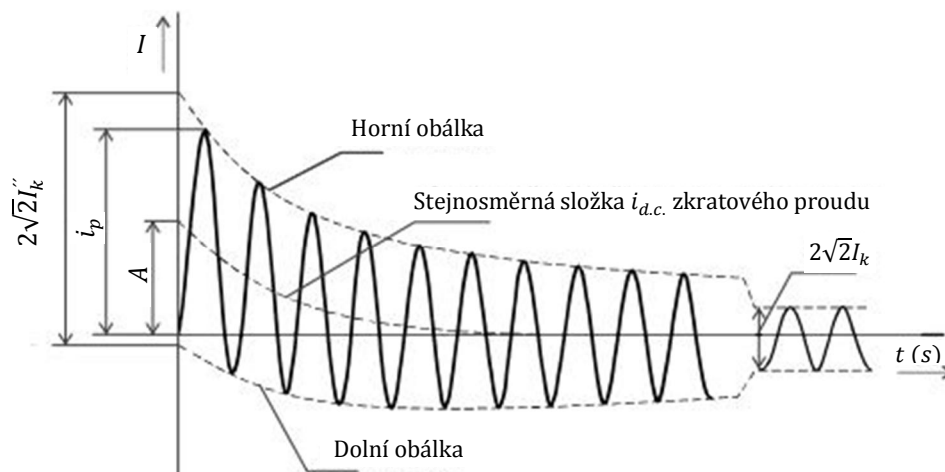


Obr. 2.4. Stejnosemřná složka

Obr. 2 Složky zkratového proudu [7]

2.2.1. Elektricky blízký zkrat

Elektricky blízký zkrat je zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje. Popřípadě příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motoru. [2]



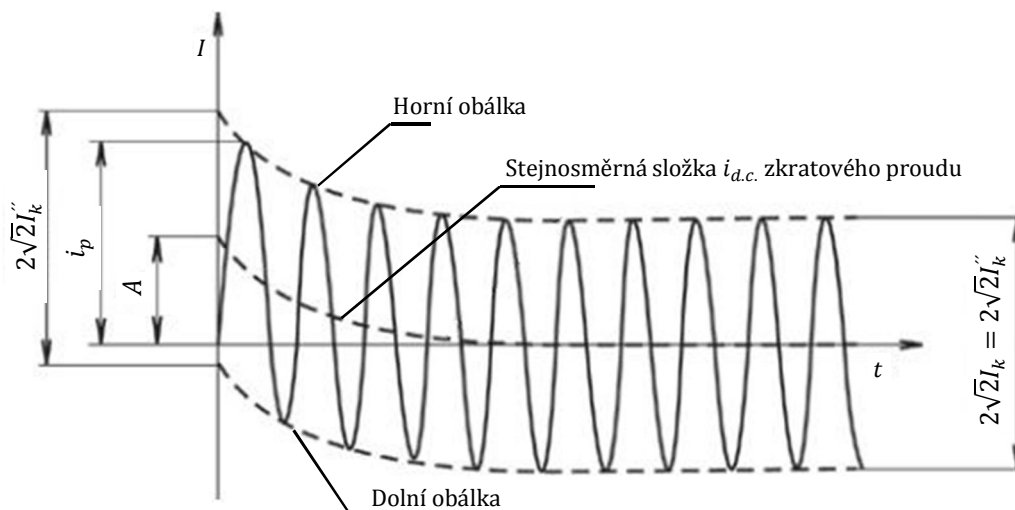
Obr. 3 Časový průběh elektricky blízkého zkratu [5]

Kde:

I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;
 I_k ustálený zkratový proud;
 i_p nárazový zkratový proud;
 A počáteční hodnota stejnosměrné složky

2.2.2. Elektricky vzdálený zkrat

Za elektricky vzdálený zkrat se považuje takový zkrat, při kterém k výslednému proudu nepřispívají nebo se dají zanedbat příspěvky zkratového proudu od asynchronních a synchronních motorů. Velikost souměrné složky zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní. [2]



Obr. 4 Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu [5]

Kde:

I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;
 I_k ustálený zkratový proud;
 i_p nárazový zkratový proud;
 A počáteční hodnota stejnosměrné složky

2.3. Účinky zkratového proudu

Působení zkratových proudů je krátkodobé, ale vzhledem k velikostem zkratových proudů mohou být jejich účinky nebezpečné nejen pro samotná zařízení ale i pro obsluhu. Mezi nejvýraznější účinky patří:

2.3.1. Elektrodynamické účinky

Příčinou vzniku elektrodynamických sil v elektrických zařízeních je existence magnetických polí. Tato pole vznikají průchodem elektrického proudu vodičem, tím vzniká síla, která způsobuje mechanické namáhání. Velikost působící síly je přímo úměrná velikosti procházejícího proudu. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu i_p . *Nárazovým zkratovým proudem i_p .*

U nedostatečně dimenzovaných zařízení s ohledem na dynamické síly při zkratu, mohou mít tyto síly velmi nepříjemné následky. Dynamické síly namáhají vodiče na ohyb, působí na podpěrky a průchodky, namáhají vinutí a jejich upevnění (čela vinutí a póly alternátorů, vinutí silových transformátorů, přístrojových transformátorů proudu), kabelové armatury a všechny přístroje, které jsou součástí zkratového obvodu. Ohybem vodičů (např.: přípojnic při zkratu na vývodu) může dojít k deformaci vodičů (často trvalé) a jejich vzájemnému dotyku nebo přiblížení natolik, že nastane nový zkrat, který postihne celou rozvodnu. Nedostatečné dimenzování podpěrek holých vedení, odpojovačů a jejich přístrojů se vlivem sil ulámou, trhají se vinutí strojů a přístrojů.

U venkovních vedení (především VVN) způsobují tyto síly výkyvy vodičů, tyto výkyvy vedou ke zmenšení vzdušné vzdálenosti mezi vodiči a tím k možným přeskokům. [3, 6]

2.3.2. Tepelné účinky

Průchodem zkratového proudu zkratovým obvodem v každém časovém okamžiku dt v něm vznikají tepelné ztráty $dQ = RI^2 dt$. Toto teplo můžeme rozdělit na dvě složky. První složka tepla se odvede ochlazením do okolí, druhá složka tepla zůstává v tělese a zvyšuje tím jeho teplotu. Při průchodu zkratového proudu můžeme, vzhledem k jeho krátkému působení, zanedbat odvod tepla do okolí a uvažovat že všechno teplo se akumuluje ve vodiči a zvyšuje jeho teplotu.

Při zvlášť velkých otepleních nastává předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů, dochází k vytavení nedokonalých spojů, praskání podpěrek a průchodek teplem, spálení vinutí strojů a přístrojů, ke spékání kontaktů spínacích přístrojů (hlavně odpojovačů). Holé vodiče (lana) ztrácejí své mechanické vlastnosti.

Velmi nebezpečné je pokud dojde k přehřátí vodiče nebo její části přístrojů a tím dojde k sublimaci izolace, při níž vznikají výbušné plyny (vodík, acetylen). [3, 6]

2.3.3. Přepětí

V souvislosti s vypínáním zkratových proudů vznikají v rozvodech přepětí dosahující hodnoty až dvojnásobku jmenovitého napětí. Vedle toho je třeba věnovat pozornost také velikosti zotavného napětí po odepnutí zkratu vypínačem. Zotavné napětí může svojí strmostí narušit nejen izolaci elektrického zařízení, ale také vlastní vypínací proces ve vypínači opětovným přeskokem vypínací dráhy a opětovným zapálením oblouku mezi kontakty vypínače, což může vést i k havárii vypínače.[6]

2.3.4. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk se může vytvořit prakticky ve všech případech zkratu. Doba vytváření oblouku je velmi krátká, řádově 10^{-6} s a dosahuje při zkratech velkých výkonů (10^3 až 10^4 kW na cm délky oblouku) a ohrožuje svými účinky jak obsluhující pracovníky tak i vlastní zařízení. Svými účinky se nejvíce může projevit v elektrických stanicích, v rozvodných zařízeních, kde je největší pravděpodobnost ohrožení zdraví a životů obsluhujících pracovníků.

Účinky elektrického oblouku jsou způsobovány především jeho zářením a tlakem. Záření může být tepelné, infračervené, viditelné a ultrafialové. Záření způsobuje nadměrné zahřátí předmětů v blízkosti elektrického oblouku. Teplota elektrického oblouku není v celém průřezu stejná. V ose oblouku je nejvyšší (až 15 000 K) a směrem k okrajům oblouku se snižuje. Okrajová teplota oblouku v místech kde plasma nezáří, je 2 000 K, až 4000 K. Její velikost je určena ionizační energií atomů plynu, ve kterém oblouk hoří. V patách oblouku dochází vlivem těchto teplot k tavení materiálu elektrod, k jeho zplynování, popř. rozstříkávání vlivem vzniklého tlaku.

Tlakové namáhání je vyvoláno expanzními tlaky plynů a par, které jsou úměrné nárazovému zkratovému proudu. Maximální tlak vznikne nejpozději 10 až 15 ms po zapálení oblouku.

U všech keramických částí (průchodek, přístrojových transformátorů, odpojovačů, podpěrek apod.) dochází k tavení, zplynování a praskání keramiky, popř. k ustřížení vlivem současného působení dynamických sil. Izolace vodičů i vnitřní povlaky instalačních trubek uhelnatí. [3, 6]

2.3.5. Pokles napětí a narušení stability

Hluboké poklesy napětí vznikající při zkratech mohou působit rušivě na chod mnoha elektrických spotřebičů. Navíc mohou být příčinou narušení stability soustavy a zvláště stability paralelního chodu alternátorů, což je jeden z nejnebezpečnějších následků zkratů. Poklesy napětí jsou způsobeny úbytky napětí na impedancích prvků sítě, které vyvolá zkratový proud. Viz Obr. 1. [6]

3. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909

3.1. Definice základních pojmů pro výpočet dle ČSN-EN-60909

Zkrat (short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat (line-to-line short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat), (line-to earth short circuit): náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci.

Zkratový proud (short-circuit current): proud, který teče místem zkratu po dobu trvání zkratu. Je to nadproud, který je důsledkem poruchy nebo nesprávného propojení v elektrickém obvodu.

Poznámka: je nutné rozlišovat mezi zkratovým proudem tekoucím v místě poruchy a příspěvky zkratových proudů ve větvích sítě (viz Obr. 5) v jakémkoli místě sítě.

Souměrný zkratový proud (symmetrical short-circuit current): efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' (initial symmetrical short-circuit current I_k''): efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' (initial symmetrical short-circuit power S_k''): pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí U_n a součinitele $\sqrt{3}$: pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$.

Poznámka: Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' se v normě ČSN-EN 60909 pro výpočetní postupy nepoužívá. Pokud se S_k'' přesto použije v souvislosti se zkratovými výpočty, například pro výpočet vnitřní impedance síťového napaječe ve spojovacím bodě Q, potom se musí použít definice v následujícím tvaru: $S_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''$ nebo $Z_Q = c \cdot U_{nQ}^2 \cdot I \cdot S_{kQ}''$.

Stejnoseměrná (aperiodická) složka $i_{d,c}$ zkratového proudu (decaying (aperiodic) component $i_{d,c}$ of short-circuit current): střední hodnota horní a dolní obálkové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p (peak short-circuit current i_p): maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu (viz Obr. 1 a 2).

Poznámka: velikost nárazového zkratového proudu závisí na okamžiku, v němž ke zkratu došlo. Výpočet třífázového nárazového zkratového proudu i_p se aplikuje na fázový vodič a okamžik, ve kterém vznikne největší možný zkratový proud. Nesoučasné zkraty se neuvažují.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b (symmetrical short-circuit breaking current I_b): efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k (steady-state short-circuit current I_k): efektivní hodnota zkratového proudu. Který zůstává po odeznění přechodného jevu (viz. Obr. 1 a 2).

Ekvivalentní elektrický obvod (equivalent electric circuit): model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků (IEV 131-01-33).

Jmenovité napětí sítě U_n (nominal system voltage U_n): sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Napětí ekvivalentního zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ (equivalent voltage source $c \cdot U_n / \sqrt{3}$): napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu. Jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

Napět'ový součinitel c (voltage factor c): poměr mezi napětím ekvivalentního napět'ového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Poznámka: uvedený napět'ový součinitel c je nutný z následujících důvodů:

- Kolísání napětí v závislosti na čase a místě
- Přepínání odboček transformátoru
- Zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí při výpočtu podle 3.3.1.
- Chování generátorů a motorů při přechodném ději

Rázové napětí synchronního stroje E'' (subtransient voltage E'' of a synchronous machine): efektivní hodnota souměrného vnitřního napětí synchronního stroje, které působí za rázovou reaktanci X_d'' v okamžiku zkratu.

Elektricky vzdálený zkrat (far-from generator short circuit): zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní (viz Obr. 4)

Elektricky blízký zkrat (near-to-generator short circuit): zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motoru (viz Obr. 3).

Zkratové impedance v místě zkratu F (short-circuit impedances at the short-circuit location F).

Sousledná zkratová impedance $Z_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy (positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ of a three-phase a.c. system): impedance sousledné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy (negative-sequence short circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of a three-phase a.c. system): impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of a three-phase a.c. system): impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu; zahrnuje trojnásobek impedance \underline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí.

Zkratová impedance \underline{Z}_k trojfázové střídavé soustavy (short-circuit impedance \underline{Z}_k of a three-phase a.c. system): zkrácené označení pro souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ pro výpočet proudů při trojfázovém zkratu.

Zkratová impedance elektrického zařízení (short-circuit impedances of electrical equipment)

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení (positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ of electrical equipment): poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí.

Poznámka: Index symbolu $\underline{Z}_{(1)}$ je možné vynechat, je-li vyloučena záměna se zpětnou a netočivou zkratovou impedancí.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ elektrického zařízení (negative-sequence short circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ of electrical equipment): poměr fázového napětí zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ elektrického zařízení (zero-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(0)}$ of electrical equipment): poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napěťového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič anebo zem tvoří společné zpětné vedení

Rázová reaktance X_d'' synchronního stroje (subtransient reactance X_d'' of a synchronous machine): reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d'' .

Poznámka: jestliže reaktanci X_d'' v ohmech dělíme jmenovitou impedancí $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$ synchronního stroje, obdržíme výsledek v poměrných jednotkách, který je označen malým písmenem $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$.

Minimální doba vypnutí t_{min} (minimum time delay t_{min}): nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Poznámka: Čas t_{min} je součtem nejkratší možné doby působení mžikové ochrany a nejkratšího vypínacího času vypínače. K nastavitelnému časovému zpoždění vypínacího zařízení se nepřihlíží.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} (thermal equivalent short-circuit current I_{th}): efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se nemění. [2]

3.2. Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost. Nelze je ale brát za zcela odpovídající skutečnosti.

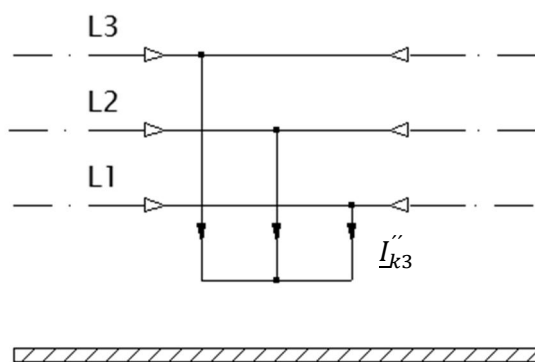
Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud. [2]

3.3. Metoda výpočtu

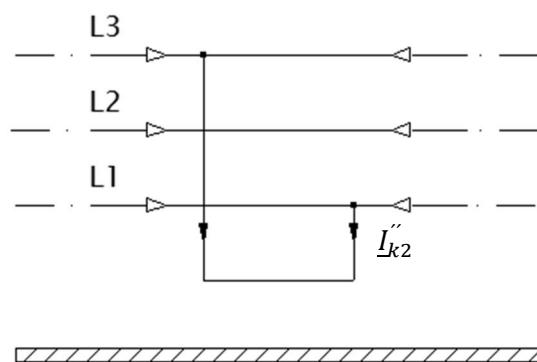
3.3.1. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Tato metoda pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Tím pádem je ekvivalentní napěťový zdroj jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napaječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí viz. Kap. 4.

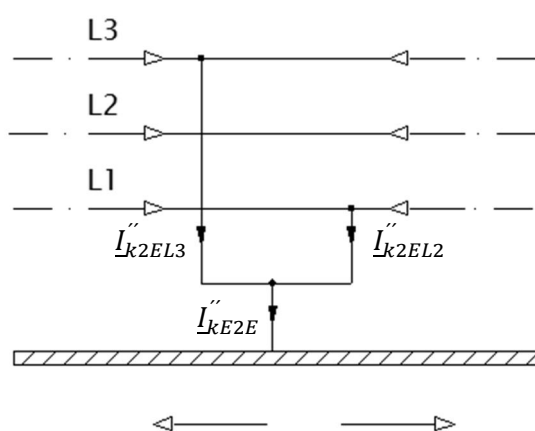
Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů, atd. jsou postradatelné; nejsou nutné výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem. [2]



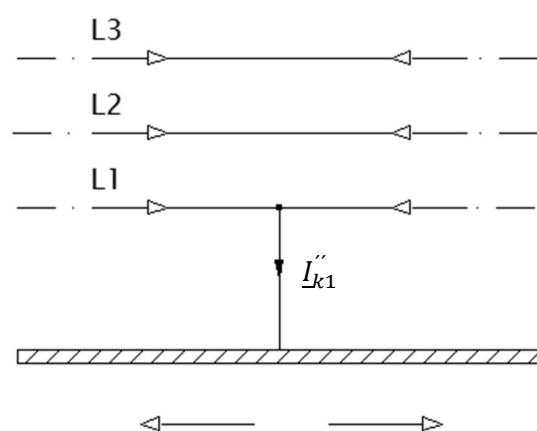
Obr. 5a Souměrný trojfázový zkrat



Obr. 5b Dvoufázový zkrat



Obr. 5c Dvoufázový zemní zkrat



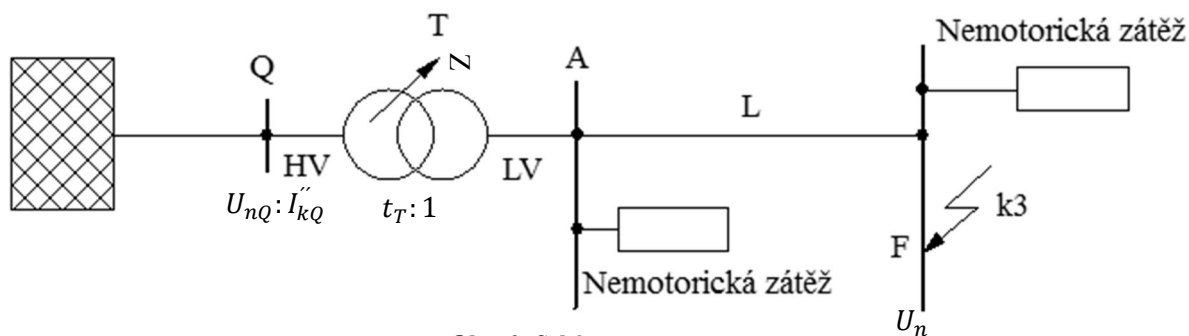
Obr. 5d Jednofázový zkrat

Poznámka: směr šipek označující proud je zvolen

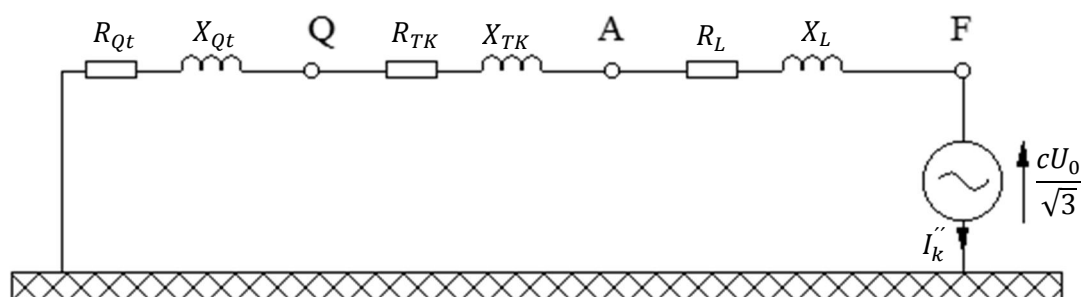
Obr. 5 Charakteristiky zkratů a jejich proudů

Obr. 6 znázorňuje příklad ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu F jakožto jediného aktivního napětí soustavy napájené transformátorem bez nebo s přepínači odboček. Všechna další aktivní napětí v soustavě jsou nulová. Nadřazená soustava na Obr. 6a je respektována pouze její vlastní vnitřní impedancí Z_{Qt} , přepočtenou na stranu nižšího napětí transformátoru a transformátorem pomocí své impedance vztažené na stranu nižšího napětí. Paralelní admitance (například kapacita vedení a pasivní zátěže) není nutno při výpočtu proudů obvodu na Obr. 6b uvažovat.

Pokud neexistují příslušné národní normy, je nejvýhodnější stanovit napěťový součinitel c podle Tab. 2. S předpokladem že nejvyšší napětí v systému bez poruchy se nebude od jmenovitého lišit v průměru o více než +5 % (na straně nižšího napětí) nebo o +10 % (na straně vyššího napětí) od jmenovitého napětí daného systému U_n . [2]



Obr. 6a Schéma soustavy



Obr. 6b Náhradní schéma obvodu sousledné složky

Obr. 6 Ilustrace výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu I''_k využívající ekvivalentní napěťový zdroj

Tab. 2 Napěťový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	Minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V (IEC 60038, tabulka I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

¹⁾ $c_{\max} \cdot U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízené energetických soustav

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max} \cdot U_n = U_m$ nebo $c_{\min} \cdot U_n = 0,90 \cdot U_m$

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6%, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%

3.3.2. Použití souměrných složek

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že zařízení má symetrickou strukturu. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost.

Pomocí této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- Proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$;
- Proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$;
- Proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$;

Budeme-li fázi L1 považovat za referenční, potom jsou proudy \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} a \underline{I}_{L3} :

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (4)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (5)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (6)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}; \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (7)$$

Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci.

Norma CSN EN 60909 pojednává o následujících typech nesouměrných zkratů:

- Dvoufázový zkrat (viz Obr. 5b)
- Dvoufázový zemní zkrat (viz Obr. 5c)
- Jednofázový zkrat (viz Obr. 5d)

Je nutné při výpočtu dle normy CSN EN 60909 rozlišovat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancemi každého elektrického zařízení.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$:

- Určíme ji přiložením souměrné soustavy napětí sousledné složky v odpovídajícím (kladném) pořadí fází do místa zkratu F . Všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny svou vnitřní impedancí.

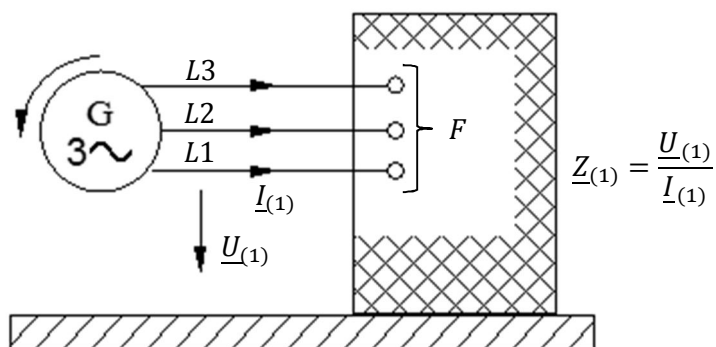
Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$:

- Určíme ji přiložením souměrné soustavy napětí sousledné složky v odpovídajícím (záporném) pořadí fází do místa zkratu F .

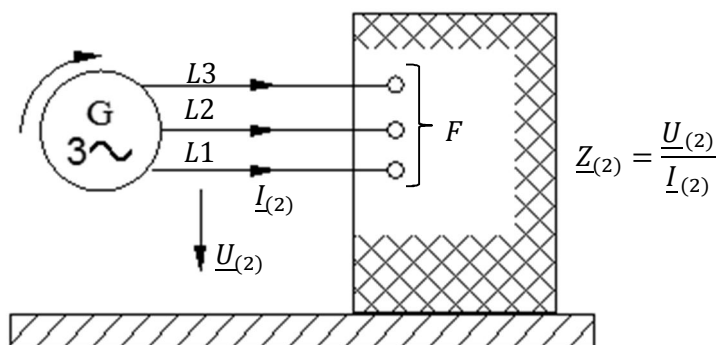
V případě točivých strojů se mohou navzájem hodnoty sousledných a zpětných impedancí lišit. Při výpočtu elektricky vzdáleného zkratu, je dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$:

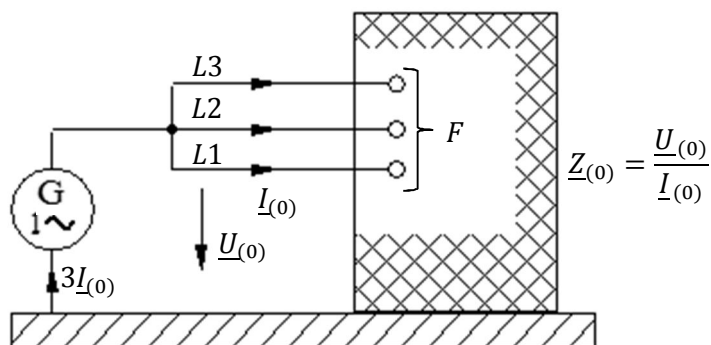
- Určíme ji přiložením střídavého napětí mezi zkratované fáze a společné zpětné vedení (například zemnicí soustavu, nulový vodič, zemnicí vodič, stíněním kabelu a pláštěm kabelu).



Obr. 7a Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$



Obr. 7b Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$



Obr. 7c Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$

Obr. 7 Zkratové impedance trojfázového střídavého systému v místě zkratu F

3.4. Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit tyto podmínky:

- Pokud není příslušná národní norma, musíme použít pro výpočet maximálních zkratových proudů napěťový součinitel c_{max} podle Tab. 2.
- Vybrat takovou konfiguraci soustavy, aby příspěvky z elektráren síťových napaječů vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Při použití ekvivalentní impedance \underline{Z}_Q , která reprezentuje vnější síť, se musí použít minimální ekvivalentní zkratové impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napaječů.
- Uvažují se rezistence vedení R_L (venkovních vedení i kabelů) při teplotě 20 °C.

3.5. Minimální zkratové proudy

Pro výpočet minimálních zkratových proudů se vychází z těchto podmínek:

- Musí se použít napěťový součinitel c_{min} .
- Zvolit vhodnou kombinaci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napaječů tak, aby v postiženém místě vznikl minimální zkratový proud.
- Motory musí být zanedbány.
- Rezistenci R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při maximální teplotě.

4. Zkratové impedance elektrických zařízení

Všeobecně:

U venkovních vedení, kabelů, reaktorů, transformátorů, síťových napáječů a podobných zařízení je sousledná a zpětná zkratová impedance soustavy shodná. $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (např. zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). v tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Pokud se počítají zkratové proudy pomocí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, musí se potom impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) vynásobit imedančními korekčními součiniteli K_G , K_T , K_S nebo K_{SO} .

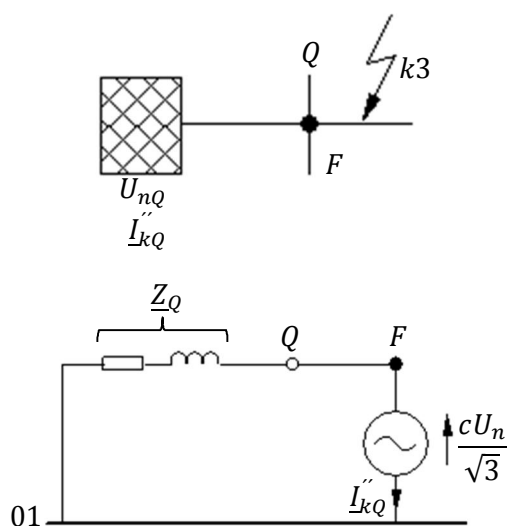
4.1. Síťové napáječe

Pokud je trojfázový zkrat v bodě připojení napáječe Q dle Obr. 8a napájen ze sítě, u které je znám pouze počáteční rázový zkratový proud \underline{I}_{kQ}'' , pak se ekvivalentní impedance (sousledná zkratová impedance) \underline{Z}_Q sítě v bodě připojení napáječe Q se určuje následovně.

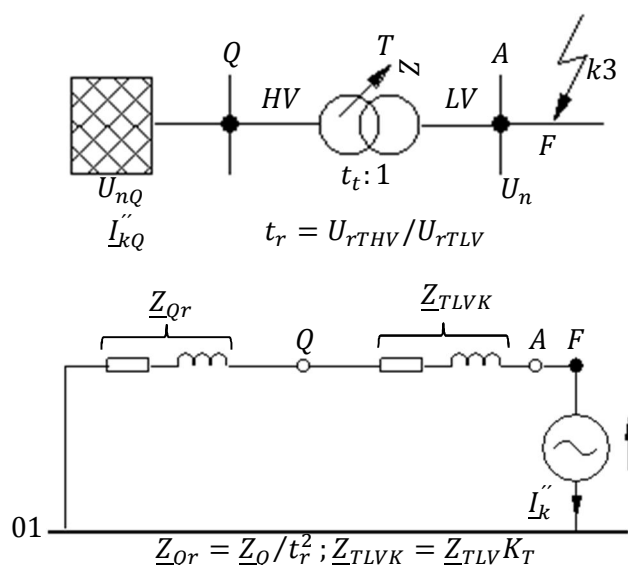
$$\underline{Z}_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}\underline{I}_{kQ}''} \quad (7)$$

Pokud je znám R_Q/X_Q , pak X_Q se vypočte následovně:

$$X_Q = \frac{\underline{Z}_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (8)$$



Obr. 8a Bez transformátoru



Obr. 8b S transformátorem

Obr. 8 Schéma soustavy a ekvivalentní náhradní schéma pro síťové napáječe

Je-li zkrat v souladu s Obr. 8b napájen transformátorem ze sítě vysokého napětí, nebo velmi vysokého a zvláště vysokého napětí, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v bodě připojení Q, pak lze souslednou ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím určit jako:

$$Z_{Qt} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (9)$$

Kde

U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q;

I''_{kQ} počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q;

c napěťový součinitel (viz. Tab. 2) pro napětí U_{nQ} ;

t_r jmenovitý převod transformátoru, při kterém je přepínač odboček v základní poloze;

V případě napáječů se jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení je možné ekvivalentní impedanci \underline{Z}_Q považovat za reaktanci, tj. $\underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$.

Provozovatel přenosové (distribuční) soustavy musí udat na straně vyššího napětí počáteční souměrné rázové zkratové proudy I''_{kQmax} a I''_{kQmin} , popřípadě se musí určit výpočtem.

4.2. Transformátory

4.2.1. Dvouvinutové transformátory

U dvouvinutových transformátorů s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich je možné vypočítat sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ ze jmenovitých údajů transformátoru následovným způsobem:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (10)$$

$$R_T \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} \quad (11)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (12)$$

Kde

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru;

P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru;

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech;

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech

Ze ztrát nakrátko P_{krT} ve vinutí při jmenovitém proudu I_{rT} se může vypočítat činná složka u_{Rr} (obě hodnoty se týkají stejné strany transformátoru).

S velikostí transformátoru obvykle roste i poměr R_T/X_T . Proto u velkých transformátorů (kde je odpor velmi malý) je možné při výpočtech velikostí zkratového proudu předpokládat, že impedanci představuje pouze reaktance. Odpor se bere v potaz, pouze při výpočtu nárazových zkratových proudů i_p nebo stejnosměrné složky $i_{d.c.}$.

4.2.2. Trojvinuťové transformátory

U trojvinuťových transformátorů lze sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ podle Obr. 9 vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100 \%} + j \frac{u_{XrAB}}{100 \%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (13)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100 \%} + j \frac{u_{XrAC}}{100 \%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (14)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100 \%} + j \frac{u_{XrBC}}{100 \%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (15)$$

s

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (16)$$

Pomocí vzorců:

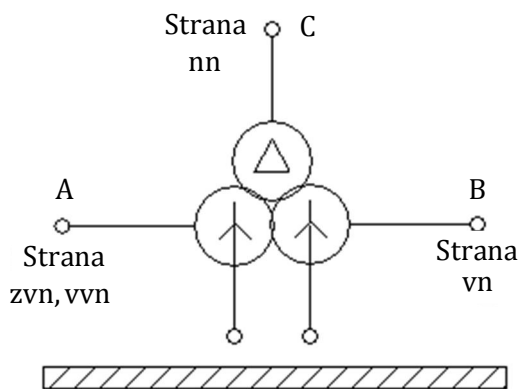
$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (17)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (18)$$

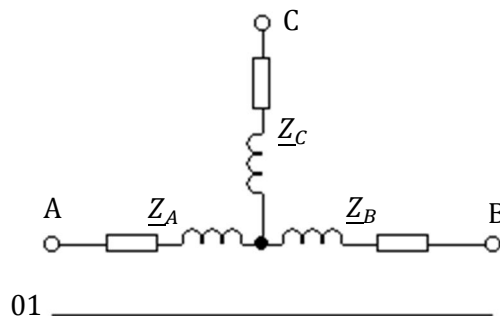
$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (19)$$

Kde

U_{rTA}	je	jmenovité napětí na straně A;
S_{rTAB}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B;
S_{rTAC}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C;
S_{rTBC}		jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C;
u_{RrAB}, u_{XrAB}	jsou	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedené v procentech mezi stranami A a B;
u_{RrAC}, u_{XrAC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedené v procentech mezi stranami A a C;
u_{RrBC}, u_{XrBC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedené v procentech mezi stranami B a C



Obr. 9a Označení zapojení vinutí



Obr. 9b Náhradní schéma (sousledné složkové soustavy)

Obr. 9 Trojvinuťový transformátor (příklad)

4.3. Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteč vodičů.

Ze jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ lze vypočítat činnou resistanci na jednotku délky R'_L venkovních vedeních při teplotě 20 °C.

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}$$

Pro:

$$\text{měď } \rho = \frac{1}{54} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1} \quad \text{hliník } \rho = \frac{1}{34} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1} \quad \text{Slitina hliníku } \rho = \frac{1}{31} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$$

Pokud je provedena transpozice pro venkovní vedení, je možné vypočítat reaktanci na jednotku délky X'_L ze vzorce:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (20)$$

Kde

- d = $\sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L2L3} d_{L3L1}}$ geometrická střední vzdálenost mezi vodiči či středem svazku;
- r poloměr jednoduchého svazku vodiče. U svazkového vodiče za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ (R poloměr svazku vodiče);
- n počet vodičů ve svazku (u jednoduchého vodiče $n = 1$);
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

4.4. Reaktory omezující zkratový proud

Za předpokladu geometrické souměrnosti jsou netočivé, sousledné a zpětné zkratové impedance stejné. Považují se za součást zkratové impedance.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100 \%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}} \quad a \quad R_R \ll X_R \quad (21)$$

Kde

- u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku;
- U_n je jmenovité napětí soustavy.

4.5. Synchronní stroje

4.5.1. Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátoru bez blokových transformátorů (v průmyslových sítích nebo nízkonapěťových sítích). Je třeba použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (22)$$

S korekčním součinitelem:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (23)$$

Kde

c_{max}	je	napěťový součinitel dle Tab. 2;
U_n		jmenovité napětí soustavy;
U_{rG}		jmenovité napětí generátoru;
\underline{Z}_{GK}		korigovaná impedance generátoru;
\underline{Z}_G		rázová impedance generátoru v sousledné soustavě: $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$;
φ_{rG}		fázový úhel mezi \underline{I}_{rG} a $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$;
x_d''		poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ kde $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$

Následující hodnoty fiktivních rezistancí R_{Gf} lze použít s dostatečnou přesností.

$R_{Gf} = 0,05 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$,

$R_{Gf} = 0,07 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ a $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$,

$R_{Gf} = 0,15 X_d''$ pro generátory s $U_{rG} \leq 1 \text{ kV}$

Součinitele 0,05, 0,07 a 0,15 respektují vznik stejnosměrné složky zkratového proudu a také respektují její zánik v průběhu první půlperiody po výskytu zkratu. Neuvažuje se vliv různých teplot vinutí na R_{Gf} .

Hodnoty fiktivních rezistancí R_{Gf} se mohou použít pro výpočet nárazového zkratového proudu. U výpočtu aperiodické složky $i_{d.c.}$ zkratového proudu se tyto hodnoty nemohou použít, používají se hodnoty R_G dány výrobcem.

4.5.2. Synchronní kompenzátory a motory

Při výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu I_k'' , souměrného zkratového vypínacího proudu I_b , nárazového zkratového proudu i_p , a ustáleného zkratového proudu I_k je možno synchronní kompenzátory počítat stejným způsobem jako synchronní generátory.

Synchronní motory s napěťovou regulací, jsou uvažovány jako synchronní generátory.

4.6. Asynchronní motory

4.6.1. Všeobecně

Motory nízkého a vysokého napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I''_k , souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a k nárazovému zkratovému proudu i_p . Při nesouměrných zkratech také přispívají k ustálenému zkratovému proudu I_k .

Příspěvek motorů vysokého napětí se musí zahrnout do výpočtu maximálního zkratového proudu. Příspěvky motorů nízkého napětí se připočítávají do výpočtu vlastní spotřeby zařízení.

Pokud je příspěvek asynchronních motorů menší než 5 % počátečního zkratového proudu I''_{kM} , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů. Není nutné u nízkonapěťové soustavy připočítávat tento příspěvek asynchronních motorů ke zkratovému proudu I''_k .

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_{kM} \quad (24)$$

Kde

$\sum I_{rM}$ je součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo (bez transformátorů) k síti kde se vyskytl zkrat;

I''_{kM} počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů.

Lze zanedbat motory nízkého napětí a vysokého napětí, které s ohledem na schéma zapojení (blokování) nebo funkci nejsou zároveň v provozu.

V sousledné a zpětné složkové soustavě lze určit impedanci $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ asynchronních motorů pomocí:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (25)$$

Kde

U_{rM} je jmenovité napětí motoru;

I_{rM} jmenovitý proud motoru;

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru ($S_{rM} = P_{rM}/(\eta_{rM} \cos \varphi_{rM})$);

I_{LR}/I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Pokud je znám R_M/X_M , pak X_M se vypočítá:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (26)$$

S dostatečnou přesností lze použít následující vztahy:

$R_M/X_M = 0,10$, s $X_M = 0,995 Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $\geq 1MW$;
 $R_M/X_M = 0,15$, s $X_M = 0,989 Z_M$ pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1MW$;
 $R_M/X_M = 0,42$, s $X_M = 0,922 Z_M$ pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů.

4.6.2. Příspěvky zkratových proudů od asynchronních motorů

Motory vysokého napětí a nízkého napětí, které jsou k síti, v níž došlo ke zkratu připojeny přes dvouvinutové transformátory, lze zanedbat při výpočtu zkratu jestliže:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100\sum S_{rT}}{\sqrt{3}U_{nQ}I'_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (27)$$

Kde

$\sum P_{rM}$	je	součet jmenovitých činných výkonů uvažovaných motorů vysokého a nízkého napětí;
$\sum S_{rT}$		součet jmenovitých zdánlivých výkonů všech transformátorů, přes které jsou přímo napájeny motory;
I'_{kQ}		počáteční souměrný zkratový proud v bodě připojení napáječe bez příspěvku motorů;
U_{nQ}		jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe

5. Výpočet zkratových proudů

Proud vzdáleného zkratu se rozděluje jako součet těchto dvou složek:

- *Střídavé složky* (po celou dobu zkratu má konstantní amplitudu)
- *Stejnoseměrné složky* (klesající k nule z počáteční hodnoty A)

V případě blízkého zkratu tvoří zkratový proud tyto dvě složky:

- *Střídavá složka* (její amplituda se během zkratu zmenšuje)
- *Stejnoseměrná složka* (klesající směrem k nule od počáteční hodnoty A)

Typ zkratu, který má nejvyšší hodnotu zkratového proudu, závisí na hodnotách sousledných, zpětných a netočivých zkratových impedancích soustavy.

5.1. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

V běžných případech, kdy je $\underline{Z}_{(0)}$ větší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ vznikne největší počáteční zkratový proud u trojfázového zkratu. Pro zkraty blízko transformátorů s nízkou netočivou impedancí může být $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(1)}$. V tomto případě se nejvyšší počáteční zkratový proud I_{kE2E}'' vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

5.1.1. Trojfázový zkrat

V obecném případě se počítá dle rovnice (28) z napětí ekvivalentního napěťového zdroje $cU_n/\sqrt{3}$ v místě zkratu a zkratové impedance $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$. Součinitel ekvivalentního napěťového zdroje c , se vezme z tab. 2.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (28)$$

5.1.2. Dvoufázový zkrat

Dvoufázový zkrat viz Obr. 5b, se musí počáteční rázový zkratový proud počítat následovně:

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' \quad (29)$$

V počátečním období zkratu je sousledná impedance přibližně rovna zpětné impedanci. Nezávisle na tom zda se jedná o zkrat blízký nebo vzdálený. Lze v rovnici (29) zavést, že $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

V případě blízkého zkratu se může zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ lišit od $\underline{Z}_{(1)}$.

5.1.3. Dvoufázový zemní zkrat

Při výpočtu je nutné rozlišit proudy I_{k2EL2}'' , I_{k2EL3}'' a I_{kE2E}'' viz Obr. 5c.

$$I_{k2EL2}'' = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (30)$$

$$I_{k2EL3}'' = jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (31)$$

$$I_{kE2E}'' = -\frac{\sqrt{3}c U_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \underline{Z}_{(0)}} \quad (32)$$

Pro vzdálený zkrat s $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$:

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{a}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (33)$$

$$I''_{k2EL3} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{a}^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (34)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (35)$$

5.1.4. Jednofázový zkrat

Dle Obr. 5d se počáteční rázový zkratový proud vypočítá při jednofázovém zkratu následovně:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (36)$$

Pro elektricky vzdálený zkrat ($\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$):

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (37)$$

5.2. Nárazový zkratový proud i_p

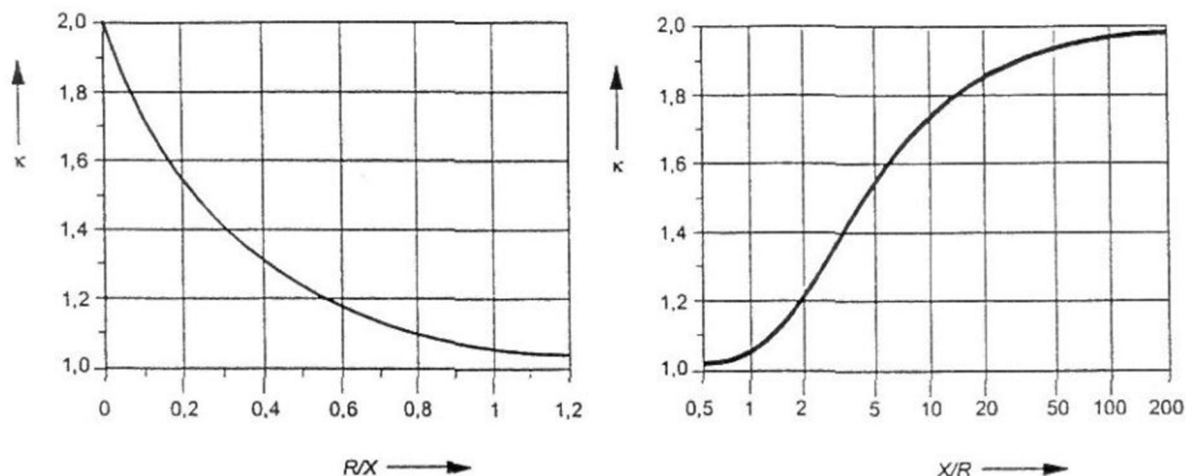
5.2.1. Trojfázový zkrat

Předpokládá se při tom, že zkrat vznikne při průchodu napětí nulou a že i_p se dosáhne přibližně po polovině prvního cyklu.

$$i_p = \kappa\sqrt{2} I''_k \quad (38)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se musí určit z Obr. 10 nebo vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} \quad (39)$$



Obr. 10 Součinitel κ pro sériové obvody jako funkce poměru R/X nebo X/R

5.2.2. Dvoufázový zkrat

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2} \quad (40)$$

Pro zjednodušení lze použít stejné hodnoty κ jako u trojfázového zkratu.

V případě $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ je nárazový zkratový proud i_{p2} při dvoufázovém zkratu menší než v případě trojfázového.

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (41)$$

5.2.3. Dvoufázový zemní zkrat

$$i_{p2E} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2E} \quad (42)$$

Pro zjednodušení lze použít stejné hodnoty κ jako u trojfázového zkratu.

Počítat i_{p2E} je nutné pouze v případech pokud je $\underline{Z}_{(0)}$ mnohem menší než $\underline{Z}_{(1)}$ (menší než $1/4 \underline{Z}_{(0)}$).

5.2.4. Jednofázový zkrat

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I''_{k1} \quad (43)$$

Pro zjednodušení lze použít stejné hodnoty κ jako u trojfázového zkratu.

5.3. Stejnosměrná složka zkratového proudu

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f t R/X} \quad (44)$$

Kde

I''_k je počáteční souměrný rázový proud;
 f jmenovitý kmitočet;
 t čas;
 R/X poměr dle rovnice (39) nebo Obr. 10

5.4. Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Tento proud se skládá ze symetrického zkratového proudu I_b a stejnosměrné složky zkratového proudu $i_{d.c.}$ v čase t_{min} dle rovnice (44).

V některých případech blízkých zkratů může hodnota $i_{d.c.}$ v čase t_{min} převýšit hodnotu I_b a to může vést k tomu, že okamžitá hodnota zkratového proudu neprochází nulou.

5.4.1. Vzdálený zkrat

V tomto případě jsou zkratové souměrné vypínací proudy rovny počátečním rázovým zkratovým proudům:

$$I_b = I_k'' \quad (45)$$

$$I_{b2} = I_{k2}'' \quad (46)$$

$$I_{b2E} = I_{k2E}'' \quad (47)$$

$$I_{b1} = I_{k1}'' \quad (48)$$

5.4.2. Blízký zkrat

5.4.2.1. Jednoduchý trojfázový zkrat

V případech jednoduchého napájení zkratu, se zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu zohledňuje pomocí součinitele μ dle rovnice (50).

$$I_b = \mu I_K'' \quad (49)$$

Součinitel závisí na minimální době vypnutí t_{min} a poměru I_{kG}''/I_{rG} (I_{rG} je jmenovitý proud generátoru).

Pokud není známá přesná hodnota, bere se jako výchozí $\mu = 1$ jiné hodnoty se použijí z rovnic (50), pokud jsou synchronní stroje buzeny pomocí točivých budičů nebo statických budičů.

Pokud je mezi generátorem a místem zkratu blokovaný transformátor, poté příspěvek zkratového proudu I_{kS}'' na straně vyššího napětí blokového transformátoru se musí přepočítat pomocí jmenovitého transformačního převodu na svorky generátoru $I_{kG}'' = t_r I_{kS}''$ před výpočtem μ s použitím následujících rovnic:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 e^{-0,26 I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 e^{-0,30 I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &= 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 e^{-0,38 I_{kG}''/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} &\geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (50)$$

V případě že I_{kG}''/I_{rG} není větší, než 2 poté platí $\mu = 1$ pro všechny minimální doby vypnutí t_{min} .

5.4.2.2. Nesouměrné zkraty

Při nesouměrných zkratových proudech se nebere v úvahu pokles magnetického toku generátoru a použijí se rovnice (46) až (48).

5.5. Ustálený zkratový proud

Výpočet ustáleného zkratového proudu I_k je méně přesný než výpočet počátečního rázového zkratového proudu I_k'' .

Pro vzdálené trojfázové zkraty napájené přímo z jednoho elektrárenského bloku nebo ze synchronního generátoru, závisí ustálený zkratový proud I_k na systému buzení napájeného ze svorek generátoru, napěťové regulaci a vlivu sycení.

Synchronní stroje (generátory, motory nebo kompenzátory) se závislým statickým budičem nepřispívají k I_k v případě zkratu na svorkách stroje. Přispívají, pokud je určitá impedance mezi těmito svorkami a místě zkratu.

5.5.1. Maximální ustálený zkratový proud

Počítá se s maximálním buzením synchronního generátoru

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (51)$$

Pro soustavy se statickým buzením napájeným ze svorek generátoru dojde při zkratu na svorkách ke zhroucení svorkového a budicího napětí, proto můžeme uvažovat $\lambda_{max} = \lambda_{min} = 0$.

Hodnoty součinitele λ_{max} se odečítají z příslušných grafů (viz. CSN EN 60909-0 str. 54).

5.5.2. Minimální ustálený zkratový proud

V případě jednoduchého zkratu z jednoho generátoru nebo jednoho elektrárenského bloku s předpokladem konstantního buzení nezátíženého synchronního stroje:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \quad (52)$$

Hodnoty součinitele λ_{min} se odečítají z příslušných grafů (viz. CSN EN 60909-0 str. 54).

V případě blízkého zkratu napájeného z jednoho nebo více podobných paralelně pracujících generátorů s kompaktním buzením se provede následovně:

$$I_{kmin} = \frac{c_{min} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (53)$$

Pro reaktanci generátorů se v tomto případě zavádí:

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} I_{kP}} \quad (54)$$

I_{kP} je ustálený zkratový proud generátoru při trojfázovém zkratu na svorkách. Hodnotu dodává výrobce.

5.6. Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací proud

Průchodem zkratového proudu v odporovém prvku soustavy se vytváří energie rovna integrálu $\int i^2 dt$. Norma popisuje postup výpočtu s použitím součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu a součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu viz Obr. 11 a Obr. 12.

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad (55)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je:

$$I_{th} = I_k' \sqrt{m + n} \quad (56)$$

V případech kdy po sobě následuje série jednotlivých trojfázových zkratů, musí se použít následující vztahy:

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}'^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k \quad (57)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \quad (58)$$

s

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \quad (59)$$

Kde

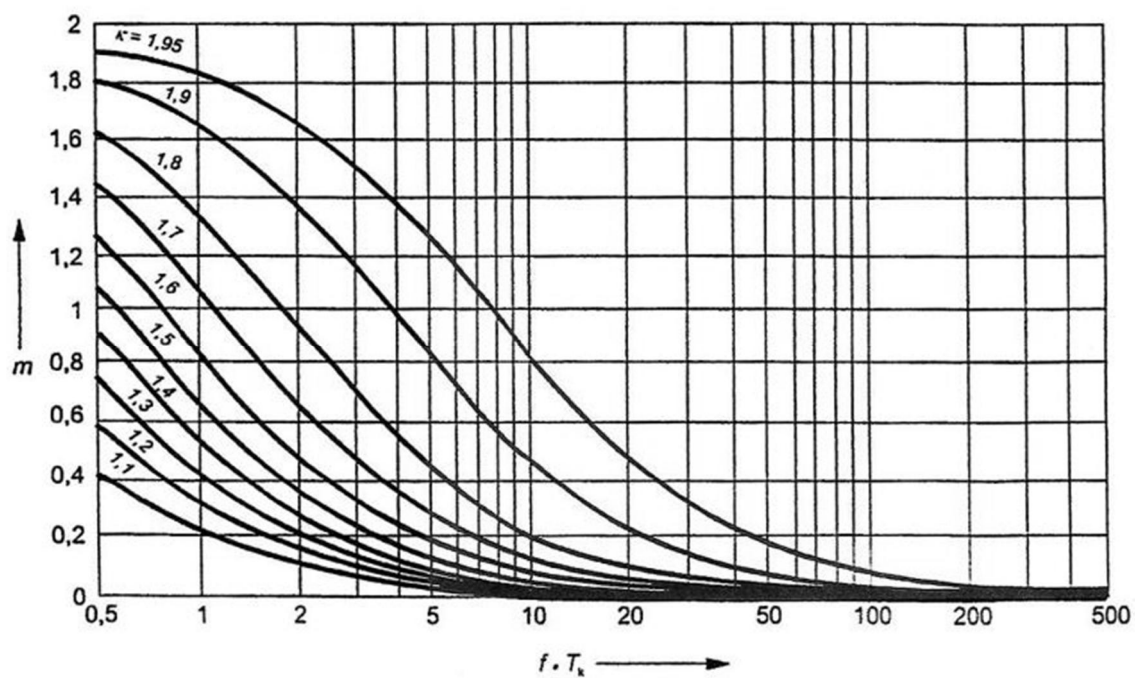
I_{ki}'	je	počáteční souměrný trojfázový zkratový proud u každého zkratu;
I_{th}		ekvivalentní oteplovací zkratový proud;
m_i		součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky pro každý zkratový proud;
n_i		součinitel pro tepelné účinky střídavé složky pro každý zkratový proud;
T_{ki}		dobu trvání zkratového proudu u každého zkratu;
T_k		součet dob trvání pro všechny zkratové proudy

Ekvivalentní oteplovací proud a Jouleův integrál se udává s dobou trvání zkratu, se kterým jsou spojeny.

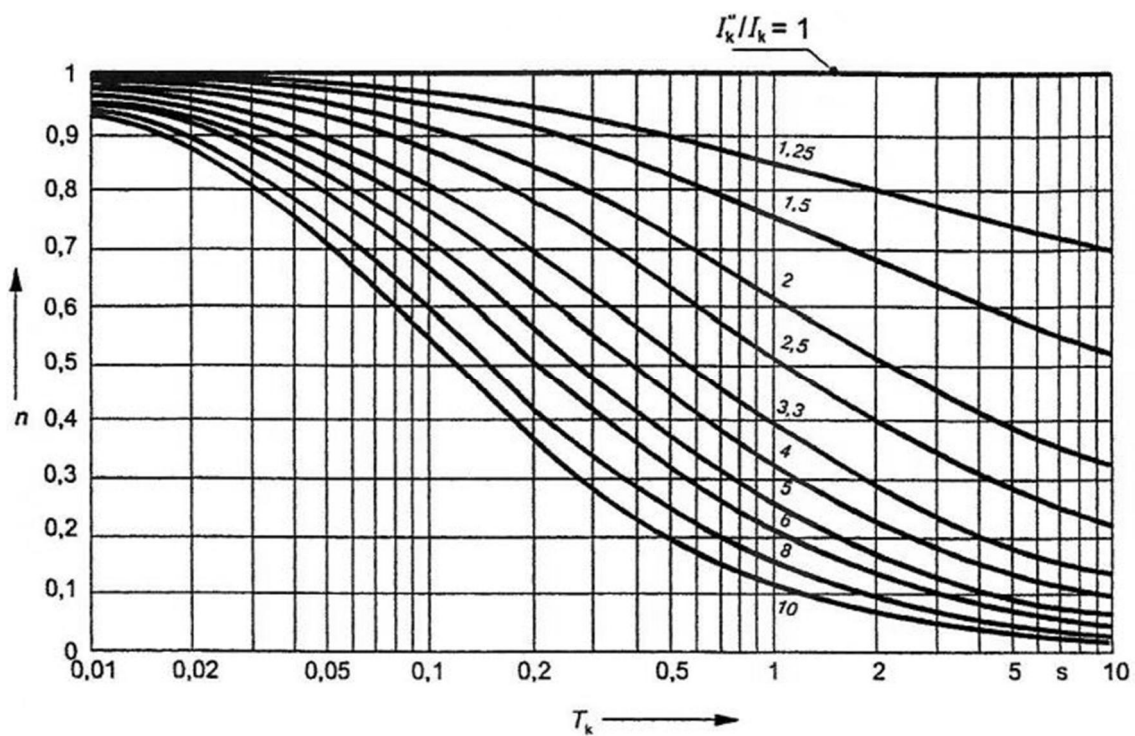
Při vzdáleném zkratu se jmenovitou dobou trvání zkratu 0,5 s nebo větší je možno uvažovat $m + n = 1$.

Pro distribuční sítě (elektricky vzdálený zkrat) se může použít $n = 1$.

V případě chránění obvodu pojistkami nebo jističi omezující proud, může mít Jouleův integrál nižší hodnotu než vypočítanou dle rovnice (55) nebo (57). V těchto případech se Jouleův integrál určuje z charakteristik zařízení omezujícího proud.



Obr. 11 Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu



Obr. 12 Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

6. Výpočet zkratových poměrů rozvoden průmyslového podniku

Maximální zkratový výkon v rozvodně ČEZ 22 KV byl uvažován 250 MVA.

Kompletní schéma rozvodny viz Příloha A.

Parametry prvků průmyslového podniku:

Synchronní motory:

Tab. 3 Parametry synchronních motorů

	S_n (MVA)	U_n (kV)	I (A)	x_d'' (%)
SM1	4,4	6	423	15
SM2	4,2	6	405	15
SM3	4,2	6	405	15

Transformátory:

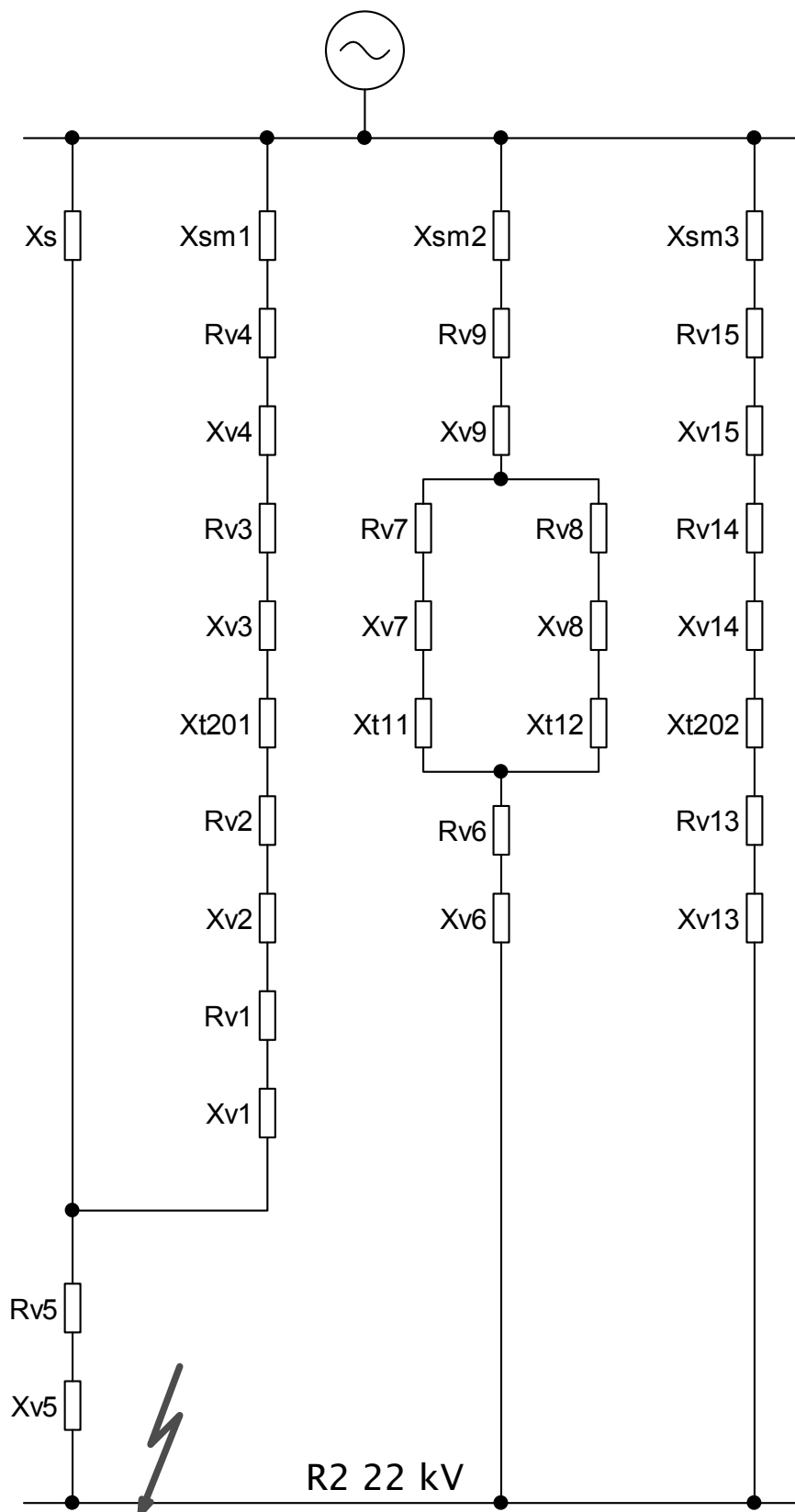
Tab. 4 Parametry transformátorů

	S_T (MVA)	U (kV)	I (A)	u_k (%)
T201	10	22 / 6	262 / 917	7,33
T202	10	22 / 6	262 / 917	7,3
T11	5	22 / 6	131 / 458	5,98
T12	5	22 / 6	134 / 458	5,97
T21	6,3	22 / 6	165 / 578	6,69

Vedení:

Tab. 5 Parametry kabelových vedení

	Typ	Průřez (mm²)	Délka (m)	R_k (Ω/km)	X_k (Ω/km)
V1	22 ANKT.	2x3x240	220	0,149	0,088
V2	22 ANKTOPV	3x240	700	0,149	0,088
V3	6 ANKAY	3x240	1600	0,149	0,078
V4	6 ANKAY	2x3x240	80	0,149	0,078
V5	22 ANKT.	3x240	510	0,149	0,088
V6	22 ANKTOP	2x3x240	90	0,149	0,088
V7	6 AKPH	2x3x240	30	0,149	0,078
V8	6 AKPH	2x3x240	25	0,149	0,078
V9	6 AKPH	2x3x240	140	0,149	0,078
V10	6 AYKCY	3x3x240	250	0,149	0,078
V11	22 ANKTOP	3x240	220	0,149	0,088
V12	6 ANKAY	3x3x150	45	0,239	0,078
V13	22 ANKTOP	3x240	550	0,149	0,088
V14	6 ANKAY	3x240	120	0,149	0,078
V15	6 AKPH	2x3x240	200	0,149	0,078



Obr. 13 Náhradní schéma zkratového obvodu rozvodny R2 22kV

Vztažný výkon: $S_v = 250 \text{ MVA}$

Reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{c \cdot S_v}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 250 \cdot 10^6}{250 \cdot 10^6} = 1,1$$

Reaktance synchronních motorů:

$$X_{sm1} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M1}} = \frac{0,15 \cdot 250 \cdot 10^6}{4,4 \cdot 10^6} = 8,5227$$

$$X_{sm2} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M2}} = \frac{0,15 \cdot 250 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 8,9286$$

$$X_{sm3} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{S_{M3}} = \frac{0,15 \cdot 250 \cdot 10^6}{4,2 \cdot 10^6} = 8,9286$$

Reaktance transformátorů:

$$X_{T201} = \frac{u_{kT201}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T201}} = \frac{7,33}{100} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 1,8325$$

$$X_{T11} = \frac{u_{kT11}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T11}} = \frac{5,98}{100} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 2,99$$

$$X_{T12} = \frac{u_{kT12}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T12}} = \frac{5,97}{100} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 2,985$$

$$X_{T202} = \frac{u_{kT202}}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{T202}} = \frac{7,3}{100} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 1,825$$

Činný odpor a induktivní reaktance:

Vedení V1:

$$R_{v1} = \frac{R_v \cdot l_{v1}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,22}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0085$$

$$X_{v1} = \frac{X_v \cdot l_{v1}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,22}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,005$$

Vedení V2:

$$R_{v2} = R_v \cdot l_{v2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,7 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0539$$

$$X_{v2} = X_v \cdot l_{v2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,7 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0318$$

Vedení V3:

$$R_{v3} = R_v \cdot l_{v3} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 1,6 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 1,6556$$

$$X_{v3} = X_v \cdot l_{v3} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 1,6 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,8667$$

Vedení V4:

$$R_{v4} = \frac{R_v \cdot l_{v4}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,08}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0414$$

$$X_{v4} = \frac{X_v \cdot l_{v4}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,08}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0217$$

Vedení V5:

$$R_{v5} = \frac{R_v \cdot l_{v5}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,51}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0196$$

$$X_{v5} = \frac{X_v \cdot l_{v5}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,51}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0116$$

Vedení V6:

$$R_{v6} = \frac{R_v \cdot l_{v6}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0035$$

$$X_{v6} = \frac{X_v \cdot l_{v6}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,088 \cdot 0,09}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,002$$

Vedení V7:

$$R_{v7} = R_v \cdot l_{v7} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,03 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0155$$

$$X_{v7} = X_v \cdot l_{v7} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,03 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0081$$

Vedení V8:

$$R_{v8} = R_v \cdot l_{v8} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,025 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0129$$

$$X_{v8} = X_v \cdot l_{v8} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,025 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0068$$

Vedení V9:

$$R_{v9} = \frac{R_v \cdot l_{v9}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,14}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0724$$

$$X_{v9} = \frac{X_v \cdot l_{v9}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,14}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0379$$

Vedení V13:

$$R_{v13} = R_v \cdot l_{v13} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,55 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0423$$

$$X_{v13} = X_v \cdot l_{v13} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,088 \cdot 0,55 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,025$$

Vedení V14:

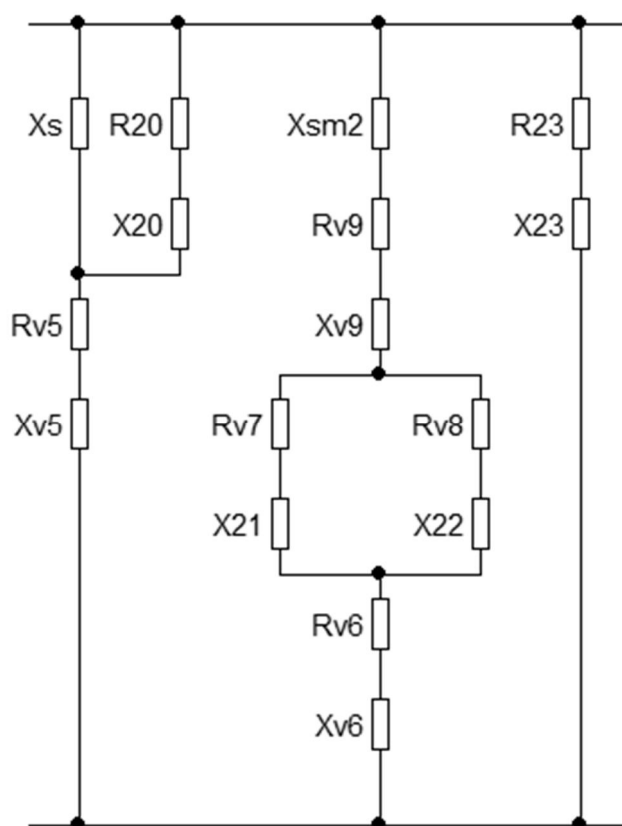
$$R_{v14} = R_v \cdot l_{v14} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,149 \cdot 0,12 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,1242$$

$$X_{v14} = X_v \cdot l_{v14} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = 0,078 \cdot 0,12 \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,065$$

Vedení 15:

$$R_{v15} = \frac{R_v \cdot l_{v15}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,149 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,1035$$

$$X_{v15} = \frac{X_v \cdot l_{v15}}{2} \cdot \frac{S_v}{U_s^2} = \frac{0,078 \cdot 0,2}{2} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 0,0542$$



Obr. 14 Zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV

$$R_{20} = R_{v4} + R_{v3} + R_{v2} + R_{v1} = 0,0414 + 1,6556 + 0,0539 + 0,0085 = 1,7594$$

$$X_{20} = X_{sm1} + X_{v4} + X_{v3} + X_{T201} + X_{v2} + X_{v1} =$$

$$= 8,5227 + 0,0217 + 0,8667 + 1,8325 + 0,0318 + 0,005 = 11,2804$$

$$X_{21} = X_{v7} + X_{T11} = 0,0081 + 2,99 = 2,9981$$

$$X_{22} = X_{v8} + X_{T12} = 0,0068 + 2,985 = 2,9918$$

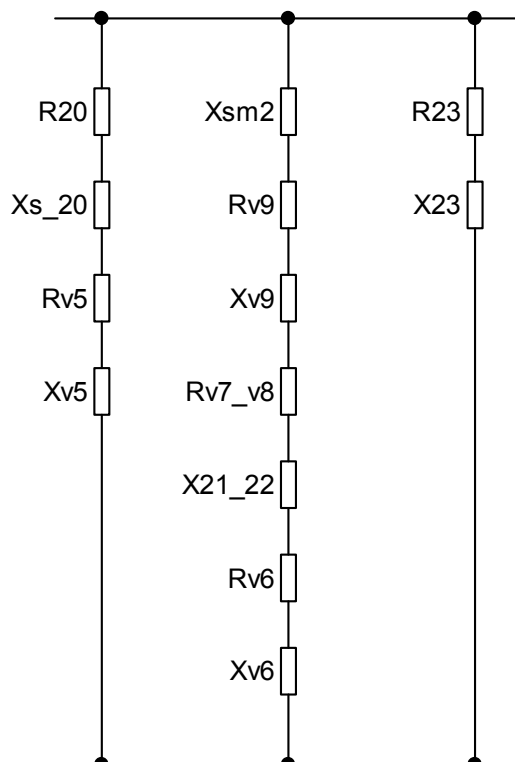
$$R_{23} = R_{v15} + R_{v14} + R_{v13} = 0,1035 + 0,1242 + 0,0423 = 0,27$$

$$X_{23} = X_{SM3} + X_{v15} + X_{v14} + X_{T202} + X_{v13} = 8,9286 + 0,0542 + 0,065 + 1,825 + 0,025 = 10,8978$$

$$X_{s_20} = \frac{X_s \cdot X_{20}}{X_s + X_{20}} = \frac{1,1 \cdot 11,2804}{1,1 + 11,2804} = 1,0023$$

$$R_{v7_v8} = \frac{R_{v7} \cdot R_{v8}}{R_{v7} + R_{v8}} = \frac{0,0155 \cdot 0,0129}{0,0155 + 0,0129} = 0,0071$$

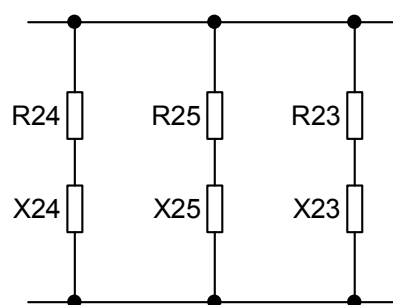
$$X_{21_22} = \frac{X_{21} \cdot X_{22}}{X_{21} + X_{22}} = \frac{2,9981 \cdot 2,9918}{2,9981 + 2,9918} = 1,4975$$



Obr. 15 Zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV

$$R_{24} = R_{20} + R_{v5} = 1,7594 + 0,0196 = 1,779$$

$$X_{24} = X_{s_20} + X_{v5} = 1,0023 + 0,0116 = 1,0139$$



Obr. 16 Výsledné zjednodušené náhradní schéma rozvodny R2 22kV

$$R_{25} = R_{v9} + R_{v7_v8} + R_{v6} = 0,0724 + 0,0071 + 0,0035 = 0,083$$

$$X_{25} = X_{SM2} + X_{v9} + X_{21_22} + X_{v6} = 8,9286 + 0,0379 + 1,4975 + 0,002 = 10,466$$

$$Z_{23} = R_{23} + j \cdot X_{23} = 0,27 + j \cdot 10,8978 \, \Omega$$

$$Z_{24} = R_{24} + j \cdot X_{24} = 1,779 + j \cdot 1,0139 \, \Omega$$

$$Z_{25} = R_{25} + j \cdot X_{25} = 0,083 + j \cdot 10,466 \, \Omega$$

Celková impedance zkratového obvodu:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{23}} + \frac{1}{Z_{24}} + \frac{1}{Z_{25}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,27 + j \cdot 10,8978} + \frac{1}{1,779 + j \cdot 1,0139} + \frac{1}{0,083 + j \cdot 10,466}} = 1,1653 + j \cdot 1,1701 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{1,1653^2 + 1,1701^2} = 1,65 \, \Omega$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^6} = 6,56 \, kA$$

Souměrný rázový zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{c \cdot I_v}{|Z|} = \frac{1,1 \cdot 6,5608 \cdot 10^3}{1,6514} = 4,37 \, kA$$

Zkratový výkon:

$$S_k = \frac{c \cdot S_v}{|Z|} = \frac{1,1 \cdot 250 \cdot 10^6}{1,6514} = 166,53 \, MVA$$

Tab. 6 Zkratové poměry jednotlivých rozvodů průmyslového podniku

	S_k (MVA)	I_k'' (kA)	Z (Ω)	$ Z $ (Ω)
R1 22kV	322,34	8,46	0,09+j0,85	0,85
R2 22kV	166,53	4,37	1,17+j1,17	1,65
R1 6kV	97,543	9,39	0,87+j2,68	2,82
R2 6kV	140,28	13,5	0,14+j1,96	1,96
R3 6kV	187,49	18,04	0,17+j1,46	1,47
R4 6kV	68,414	6,58	0,06+j4,02	4,02
R5 6kV	127,04	12,7	0,15+j2,16	2,17

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo v první části nastínit problematiku zkratových jevů. Jejich teoretický rozbor od samostatného vzniku zkratu, druhu zkratů, jejich možného průběhu až k samotným následkům zkratových proudů na samotná zařízení a bezprostřední okolí.

Dále nastínit metodiku výpočtu dle platné normy ČSN EN 60909, která nahrazuje starší (dnes již neplatnou) normu ČSN EN 33 3020 a ČSN EN 33 3022. Tato platná norma nám umožňuje provádění výpočtů zkratových proudů s dostatečnou přesností. Velikost zkratových proudů je nutné znát z důvodu dimenzování elektrizačních zařízení a tím zamezením případným škodám. Zkratové proudy dosahují značných velikostí a tím velkých oteplení zasažených vodičů. Vypínacích proudů, které musí pojistka popřípadě výkonový vypínač bezpečně vypnout. Značným dynamickým namáháním podpěrných systémů a koncovek a mnohým dalším problémům, který musí postižené zařízení odolat.

Poslední část výše uvedené poznatky využívá při praktickém výpočtu zkratových poměrů pro rozvodny vn průmyslového podniku. Ve kterém je spočítán souměrný rázový zkratový proud a zkratový výkon pro každou rozvodnu viz. Tab. 6 a to pomocí poměrných jednotek. Názorný výpočet s postupem byl proveden pro rozvodnu R2 22kV. Ostatní rozvodny byly počítány obdobně dle příslušných náhradních schémat, které jsou uvedeny v příloze.

Použitá literatura:

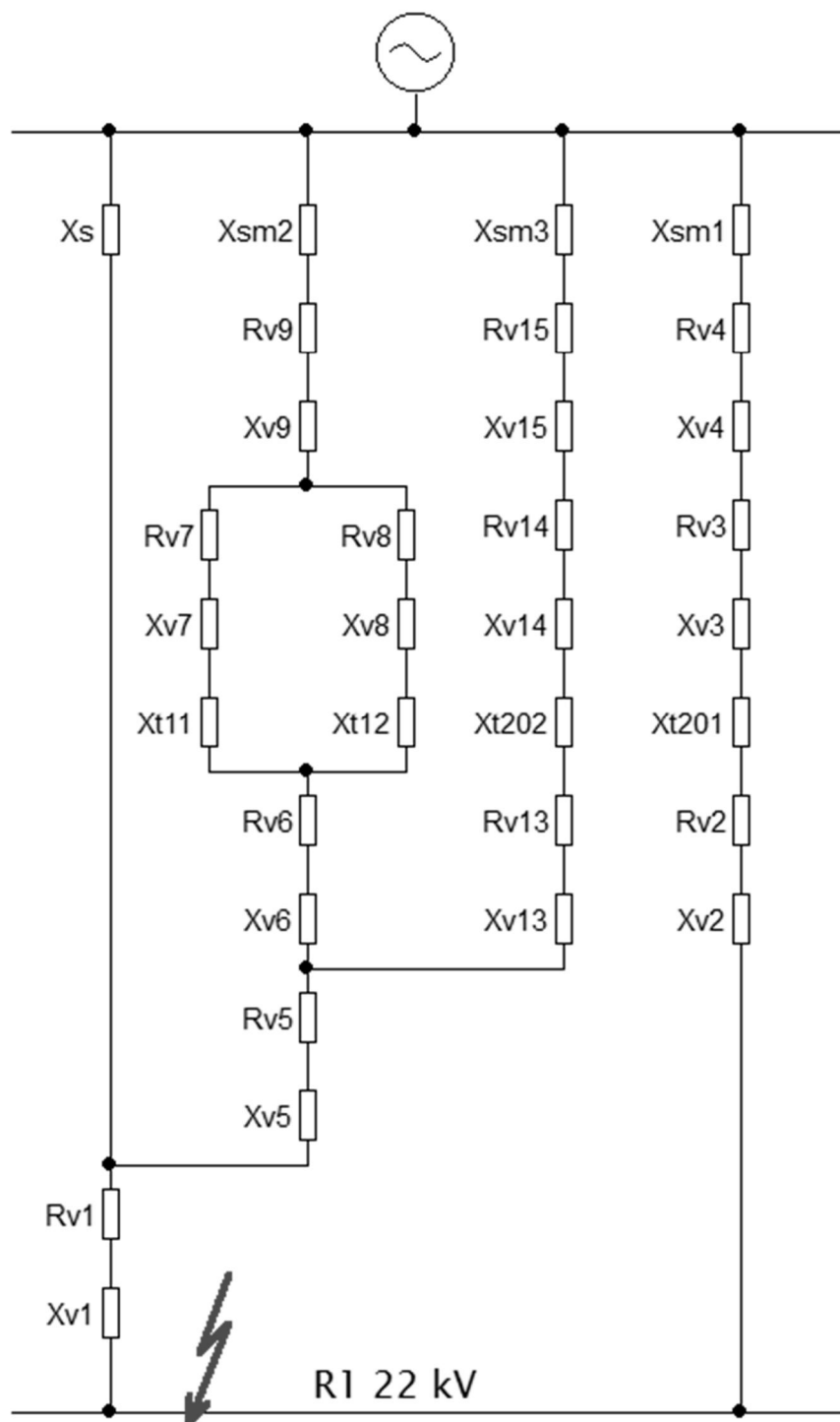
- [1]. Trojánek, Z.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. SNTL, Praha 1987.
- [2]. ČSN EN 60909-0.: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. Květen 2002.
- [3]. Havelka, O a kol.: *Elektrické přístroje*. SNTL, Praha 1985
- [4]. *Zkraty%20-%20opora.pdf* [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z:
http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/Zkraty%20-%20opora.pdf
- [5]. *Zkraty v elektrických rozvodech nn*. [online]. 2007, č. 7 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el060742.pdf>
- [6]. Pauza, J.: *Zkraty v elektrických rozvodech*. SNTL, Praha 1970
- [7]. Toman, P.: *Provoz distribučních soustav*, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04935-8

Seznam příloh:

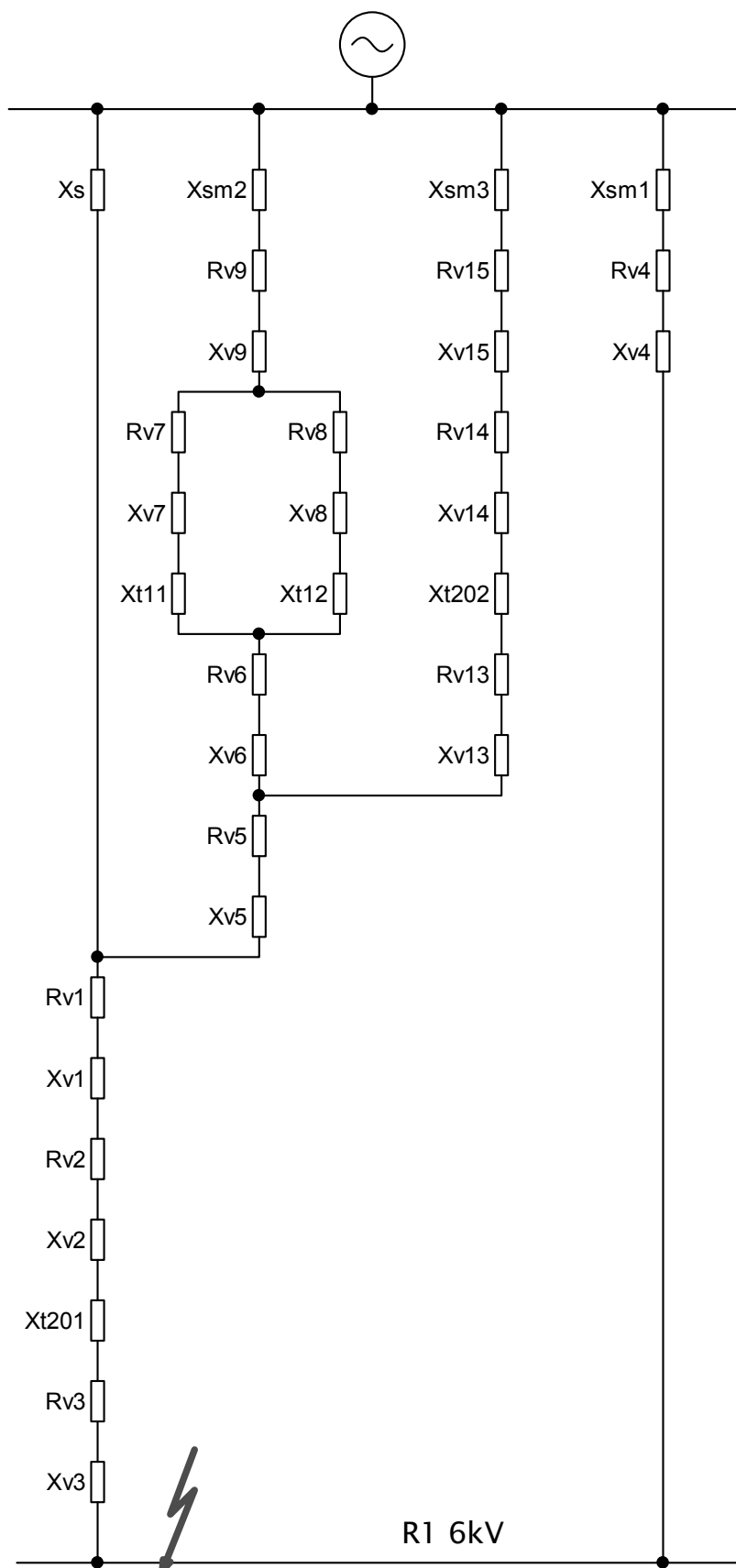
A. Celkové schéma rozvodny VN průmyslového podniku	I
B. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R2 22kV	II
C. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R1 6kV	III
D. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R2 6kV	IV
E. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R3 6kV	V
F. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R4 6kV	VI
G. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R5 6kV	VII

[illegible]

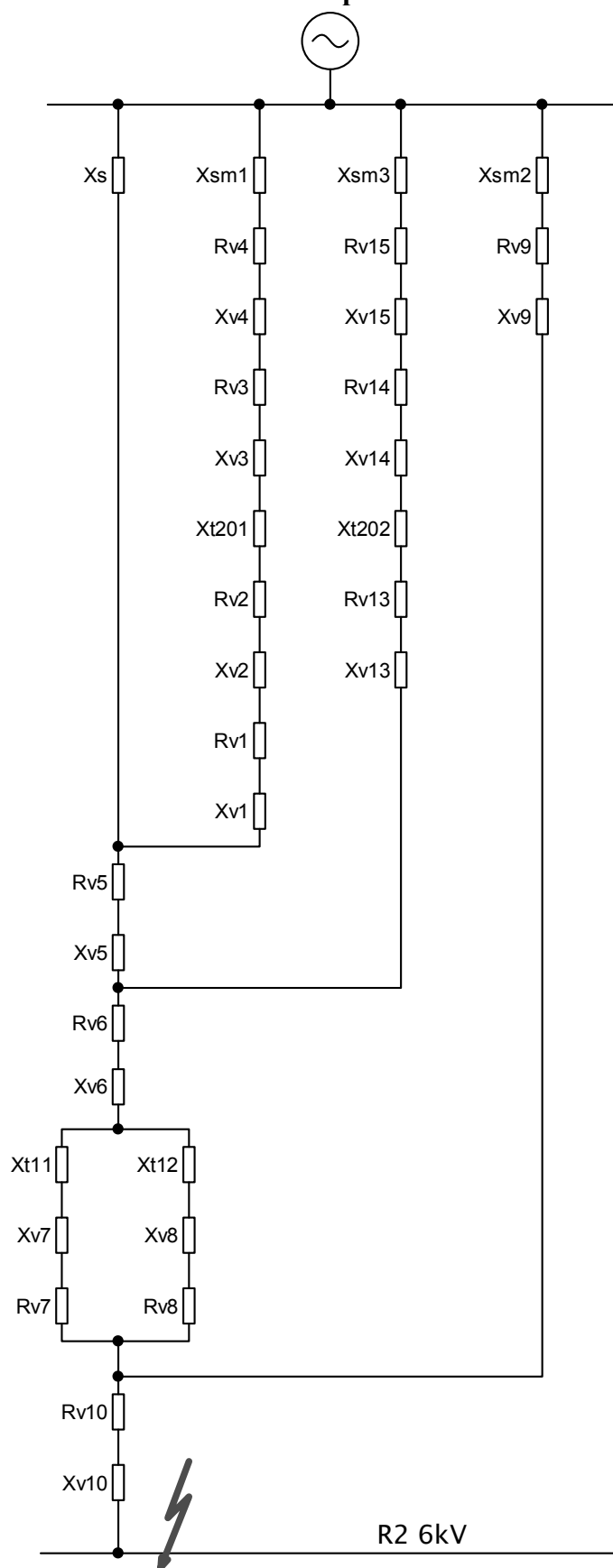
B. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R1 22kV



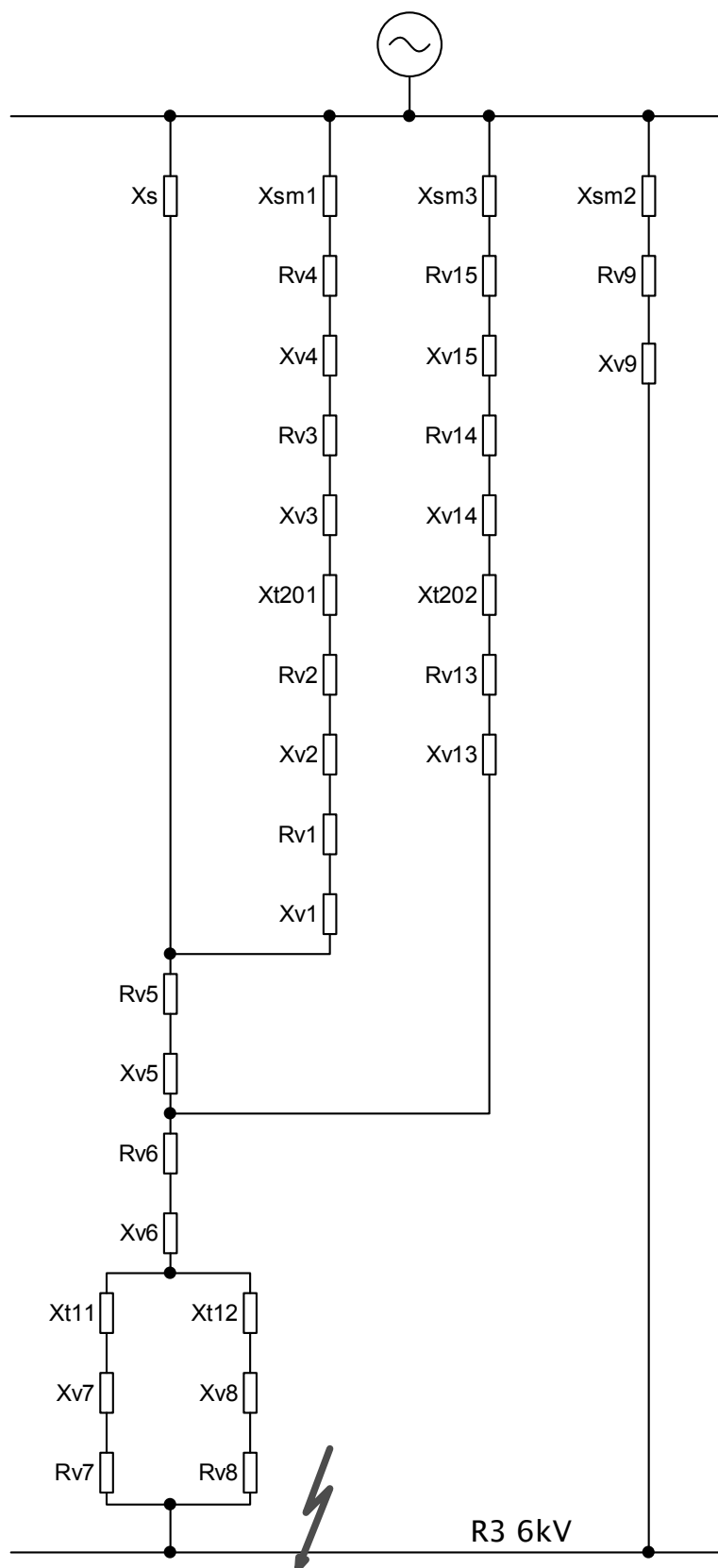
C. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R1 6kV



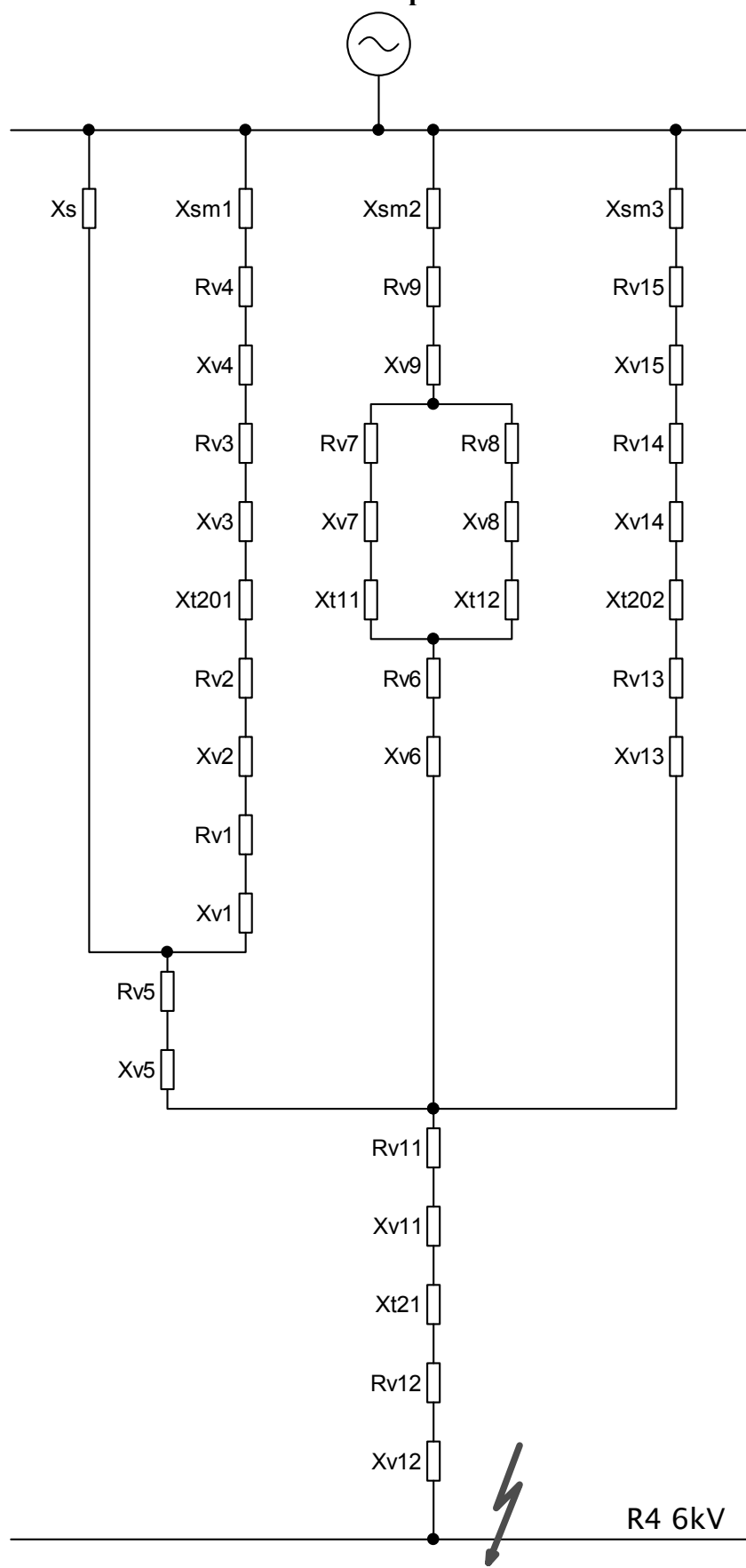
D. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R2 6kV



E. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R3 6kV



F. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R4 6kV



G. Náhradní schéma zkratového obvodu pro rozvodnu R5 6kV

